



НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ КОНФЕРЕНЦІЇ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCES

Національний університет кораблебудування
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

**СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА:
СТАН ТА ПРОБЛЕМИ
МАТЕРІАЛИ**
**XII МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

05–07 листопада 2025 року

**SHIP POWER ENGINEERING:
STATE AND PROBLEMS
PROCEEDINGS**

OF THE XII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE

November 05 - 07, 2025



Миколаїв (Mykolaiv) 2025

Міністерство освіти і науки України (*Ministry of Education and Science of Ukraine*)
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(*Admiral Makarov National University of Shipbuilding*)
ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування»
(*State Research and Design Shipbuilding Centre*)
ДП НВК газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»
(*Gas Turbine Research & Production Complex "Zorya" - "Mashproekt"*)
Одеський національний морський університет (*Odessa National Maritime University*)
Херсонська державна морська академія (*Kherson State Maritime Academy*)
Batumi Navigation Teaching University (Georgia)
(*Батумський навігаційний навчальний університет (Грузія)*)
Kielce University of Technology (Poland) (*Келецький технологічний університет (Польща)*)
Jiangsu University of Science and Technology (China) (*Університет науки і технологій Цзянсу (Китай)*)
Bureau Veritas (Marine & Offshore) (Canada) (*Бюро Верітас: (Морські та шельфові споруди) (Канада)*)
Aalborg University (Denmark) (*Ольборзький університет (Данія)*)

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА: СТАН ТА ПРОБЛЕМИ

XII Міжнародна науково-технічна конференція

МАТЕРІАЛИ

05-07 листопада 2025 року

*Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, вул. Героїв України, 9*

*Машинобудівний навчально-науковий інститут,
вул. Ковальська, 5*

Миколаїв
Видавець Ємельянова Т.В.
2025

УДК 629.5:62
С 89

ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

Міністерство освіти і науки України (*Ministry of Education and Science of Ukraine*)

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(*Admiral Makarov National University of Shipbuilding*)

ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» (*State Research and Design Shipbuilding Centre*)

ДП НВК газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект»
(*Gas Turbine Research & Production Complex "Zorya"- "Mashproekt"*)

Одеський національний морський університет (*Odessa National Maritime University*)

Херсонська державна морська академія (*Kherson State Maritime Academy*)

Batumi Navigation Teaching University (Georgia) (*Батумський навігаційний навчальний університет (Грузія)*)

Kielce University of Technology (Poland) (*Келецький технологічний університет (Польща)*)

Jiangsu University of Science and Technology (China) (*Університет науки і технологій Цзянсу (Китай)*)

Bureau Veritas (Marine & Offshore) (Canada) (*Бюро Верітас: (Морські та шельфові споруди) (Канада)*)

Aalborg University (Denmark) (*Ольборзький університет (Данія)*)

***Матеріали публікуються за оригіналами, які представлені авторами.
Претензії щодо змісту та якості матеріалів не приймаються.
Відповідальність за зміст несе автор.***

Відповідальний за випуск
Личко Богдан Михайлович

С 89 Суднова енергетика: стан та проблеми: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: Вид. Ємельянова Т. В., 2025. – 405 с.

У збірнику наведенні матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». Збірник становить інтерес для наукових працівників, викладачів, інженерів та студентів.

ISBN 978-966-2650-50-1

Ship Power Engineering: State and Problems: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference. – Mykolaiv: Publisher Yemelyanova T. V., 2025. – 405 p.

The volume contains the proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference «Ship Power Engineering: State and Problems». The collection is of interest to scientists, lecturers, engineers, and students.

УДК 629.5:62

© Національний університет кораблебудування, 2025
© Admiral Makarov National University of Shipbuilding 2025

ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

УДК 621.4:620.9

Modern Trends in Marine Power Engineering and Ship Energy Efficiency Improvement

Korobko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine. volodymyr.korobko@nuos.edu.ua

Abstract. The current state and further development of maritime transport are largely driven by IMO requirements to limit environmentally harmful emissions, particularly GHG. This issue is relevant to the design and construction of new ships, but it is even more critical for vessels already in service. Monitoring ship performance via the Carbon Intensity Indicator (CII) creates demand for technologies capable of radically reducing GHG emissions [1]. These factors, in turn, necessitate specialists with appropriate competencies.

Keywords: ship power plants, energy-saving technologies, propulsion complex.

Relevance of the study. Both newly built and operating vessels must ensure minimal pollutant emissions. A range of technical solutions aimed at this goal is known; however, their applicability must be substantiated for each specific project. Consequently, there is a need for updated approaches to improving the efficiency of ship power plants (SPPs).

Aim of the study. To analyze contemporary approaches to enhancing the efficiency and environmental performance of ships and their power plants over the life cycle, and to identify the most appropriate technical solutions.

Main content. In recent years, marine power engineering has undergone substantial qualitative changes. This work analyzes the configuration of power plants on selected modern vessel types built between 2020 and 2024. Separate attention is given to examples of Retrofit Projects for ships in operation, in which solutions stipulated by existing SEEMPs were implemented.

Even a preliminary analysis of SPP configurations shows that newbuilds are almost devoid of exhaust-gas waste-heat recovery systems capable of producing mechanical work. This outcome is expected, given the temperature potential of the available thermal discharges.

Container ships. In 2020–2024, major logistics companies placed series orders for ULCS with capacities of 20,000–24,400 TEU. All such vessels employ single-shaft SPPs with low-speed main engines. Most of these engines run on low-sulfur fuels—MGO, LSFO, or ULSFO—while dual-fuel ICEs capable of operating on methanol and cryogenic liquefied fuels (LNG and LNH₃) are also widespread [2]. A distinctive feature of these SPPs is the absence of advanced WHRS that were common on earlier builds, such as Maersk Line’s Triple-E class (e.g., **Mærsk Mc-Kinney Møller**). WHRS on current vessels do not produce mechanical work; they perform purely thermal duties. A representative example is the SPP of the container ship **MSC IRINA** (IMO 9929429) with a dual-fuel WinGD 11X92 main engine.

There are isolated cases of ORC-based WHRS on ships [3]. For instance, on the container ship **Arnold Maersk** (IMO 9260433, Wärtsilä 12RTA96C), the Hydrocurrent 125EJW ORC unit—utilizing waste heat from the ME and DG cooling systems—was investigated. Trials showed that seawater temperature significantly affected system performance. The achieved ORC output was 62–75 kW, with an aggregate mass of 38 tons, which is not satisfactory [4].

Bulk carriers and tankers. A similar trend toward simplification of waste-heat utilization is observed for modern bulk carriers and tankers, as their main engines are typically of lower power and, thus, the available waste-heat volumes are smaller.

At the same time, overall energy efficiency across modern vessels is increasing, as evidenced by achieved EEDI and EEXI levels. This improvement is evidently supported by other technical and organizational measures that reduce fuel consumption.

A hallmark of current practice is the concurrent use of several fundamentally different energy-saving technologies on the same vessel, yielding a pronounced synergistic effect.

Design efforts are primarily focused on raising the efficiency of the propulsion complex. In virtually all reviewed projects, various **Energy-Saving Devices (ESDs)** are implemented to improve propulsion-plant efficiency [5–7]. Significant progress has been made in reducing hydrodynamic resistance components, particularly by enhancing the propeller–hull interaction. Installation of **Air Lubrication Systems (ALS)** reduces frictional losses along the hull during transit [8].

Considerable attention is also directed toward the use of renewable energy onboard. Numerous examples demonstrate the application of **Wind-Assisted Propulsion Systems (WAPS)**, envisaged both for newbuilds and for modernization of existing ships within Retrofit Projects [9].

Conclusions

The shipbuilding and maritime transport markets are developing dynamically, which underscores the need to train qualified specialists capable of operating under such conditions. Marine power engineering is a knowledge-intensive field of engineering that requires the development and practical implementation of new technical solutions and the availability of appropriately trained personnel.

The task for higher education is to provide students with the necessary professional competencies and to develop skills for subsequent engineering practice. A viable way to achieve this is to employ innovative, systems-oriented approaches to organizing the educational process—particularly the implementation of **Problem-Based Learning (PBL)** principles—and to update educational programs within the field of knowledge **G11 Mechanical Engineering (135 Shipbuilding)**.

Literature

1. DNV. (n.d.). *CII – Carbon Intensity Indicator*.
<https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/>

2. Ship Technology. (n.d.). *The top 10 largest container ships in the world*. <https://www.ship-technology.com/features/the-top-10-largest-container-ships-in-the-world/>
3. Sellers, C. (2017). Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water. *Energy Procedia*, 129, 495–502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.168>
4. Konur, O., Colpan, C. O., & Saatcioglu, O. Y. (2022). A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 4083–4122. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2072981>
5. Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2023). Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean Engineering*, 280, 114670. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670>
6. Dang, J., Chen, H., Dong, G., Ploeg, A., Hallmann, R., & Mauro, F. (2011). *An exploratory study on the working principles of energy saving devices (ESDs)*.
7. Green Retrofitting through Improved Propulsion (GRIP). (2015). *Final report* (Project No. FP7-284905). European Commission. <https://cordis.europa.eu/docs/results/284/284905/final1-grip-final-report-v10-mp-18052015f.pdf>
8. Wang, H., Wang, K., & Liu, G. (2022). Drag reduction by gas lubrication with bubbles. *Ocean Engineering*, 258, 111833. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111833>
9. Kolodziejski, M., & Sosnowski, M. (2025). Review of wind-assisted propulsion systems in maritime transport. *Energies*, 18(4), 897. <https://doi.org/10.3390/en18040897>

MODERN TRENDS IN MARINE POWER ENGINEERING AND SHIP ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT

Korobko V.V.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine. volodymyr.korobko@nuos.edu.ua

Abstract. The current state and further development of maritime transport are largely driven by IMO requirements to limit environmentally harmful emissions, particularly GHG. This issue is relevant to the design and construction of new ships, but it is even more critical for vessels already in service. Monitoring ship performance via the Carbon Intensity Indicator (CII) creates demand for technologies capable of radically reducing GHG emissions [1]. These factors, in turn, necessitate specialists with appropriate competencies.

УДК 621.436:629.5.064

МЕТОД ПАРАЛЕЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В ЦИЛІНДРІ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ (ТИСК У ЦИЛІНДРІ+ВІБРОАКУСТИКА)

Варбанець Р. А., д. т. н., професор; Мінчев Д. С., д. т. н., професор; Кучеренко Ю. М., к. т. н., доцент; Кирилай О. І., к. т. н., доцент
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
E-mail: roman.varbanets@gmail.com

Анотація: представлено метод паралельного моніторингу суднових дизельних двигунів, заснований на синхронному аналізі тиску в циліндрі та віброакустичних сигналів. Новий алгоритм визначення верхньої мертвої точки (ВМТ) з використанням трьох невідомих параметрів забезпечує високоточне визначення моментів робочого циклу. Система дає змогу здійснювати контроль процесу згоряння в реальному часі та підтримує цифровий двійник **Blitz-PRO** для прогнозової діагностики. Лабораторні та морські випробування

продемонстрували зниження витрати палива та шкідливих викидів відповідно до вимог ІМО щодо декарбонізації морського транспорту

Ключові слова: *судновий дизельний двигун, тиск у циліндрі, діагностика, верхня мертва точка, цифровий двійник, вейвлет-аналіз.*

Мета дослідження

Розробити та експериментально перевірити метод паралельного моніторингу робочого процесу суднових дизелів на основі одночасного аналізу тиску в циліндрі та віброакустичних сигналів з метою підвищення точності визначення фаз газорозподілу, покращення керування згорянням і зниження витрати палива та шкідливих викидів.

Основна частина

Запропоновано метод паралельного моніторингу робочого процесу суднових дизелів на основі одночасного аналізу тиску в циліндрі та віброакустичних сигналів. Даний підхід забезпечує можливість точного визначення фаз газорозподілу та паливоподачі. Запропоновано новий алгоритм ідентифікації верхньої мертвої точки при трьох невідомих параметрах: ВМТ, тиск наддуву P_{scav} і дійсна ступінь стиснення. Система DEPAS 5.0W забезпечує вимірювання тиску до 250 бар, вібросигналів у високочастотному діапазоні та бездротову передачу даних. Живлення системи складає 3,6 V, 60 mA, повна маса вимірювального комплексу не більше 0,6 кг. В системі передбачено підтримка цифрового двійника Blitz-PRO (розробник проф. Д. С. Мінчев) для прогнозування технічного стану циліндропоршневої групи та механізму газорозподілу, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення та оптимізувати роботу паливної апаратури. Поєднання частотного аналізу (FFT) та wavelet-аналізу дає можливість локалізувати події у часі та отримувати додаткову інформацію про процес горіння. Для оперативної оцінки стабільності робочого процесу застосовано індекс нерівномірності циклів СІІ та коефіцієнт варіації COV. Проведено лабораторні випробування на дизелі NVD24 OHMU, а також морські випробування на судах mv “Egy Crown”, mv “Vilnius” та mv “Kaunas” у 2025 році. Результати показали можливість зниження питомої витрати палива та шкідливих викидів при експлуатації суднових дизелів, що сприяє досягненню вимог ІМО щодо декарбонізації морського транспорту. Запропонований підхід забезпечує підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок шляхом високоточного контролю параметрів робочого циклу та оперативного регулювання процесів згоряння і фаз газорозподілу у реальних умовах експлуатації.

Висновки

1. Запропоновано новий алгоритм визначення ВМТ при трьох невідомих параметрах, який забезпечує високу точність фазового аналізу.
2. Реалізована система **DEPAS 5.0W** дозволяє виконувати синхронні вимірювання тиску та вібросигналів із бездротовою передачею даних.
3. Інтеграція з цифровим двійником **Blitz-PRO** забезпечує прогнозування технічного стану елементів ЦПП та механізму газорозподілу.
4. Використання комбінованого FFT- та wavelet-аналізу дозволяє детально досліджувати процес згоряння та локалізувати події у часі.
5. Результати лабораторних і морських випробувань підтверджують ефективність методу: досягнуто зниження питомої витрати палива та шкідливих викидів, що відповідає вимогам ІМО щодо декарбонізації.
6. Запропонований підхід забезпечує підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок у реальних умовах експлуатації.

Література:

- [1] Varbanets R., et al. Advanced marine diesel engines diagnostics for IMO decarbonization compliance. AIP Conf. Proc., 3104(1), 2024.
- [2] Kefalas A., et al. Estimation of Combustion Parameters from Engine Vibrations Based on Discrete Wavelet Transform and Gradient Boosting. Graz University of Technology, 2023

METHOD OF PARALLEL MONITORING OF THE WORKING PROCESS IN A MARINE ENGINE CYLINDER (CYLINDER PRESSURE + VIBROACOUSTICS)

*Varbanets Roman Anatoliiovych, Minchev Dmytro Stepanovich, Kecherenko Yurii Mykolayovich, Kirilash Olena Ivanivna.
Odessa National Maritime University, Ukraine
E-mail: roman.varbanets@gmail.com*

Abstract. *The paper presents a parallel monitoring method for marine diesel engines based on synchronous analysis of in-cylinder pressure and vibroacoustic signals. A new TDC detection algorithm using three unknown variables ensures highly accurate timing determination. The system enables real-time combustion control and supports the Blitz-PRO digital twin for predictive diagnostics. Laboratory and sea trials demonstrated fuel consumption and emission reduction in accordance with IMO decarbonization requirements.*

Keywords: marine diesel engine, cylinder pressure, diagnostics, TDC, digital twin, wavelet analysis.

УДК 532.5

OPTIMIZATION OF WIRE-MESH SENSORS FOR MULTIPHASE FLOW MEASUREMENT WITH EXTENDED CAPABILITIES

*I. Dolganov, PhD., research associate; K. Przybysz, intern student; A. Duisebayeva, intern student,
University of Luxembourg
Luxembourg, Luxembourg*

¹iurii.dolganov@uni.lu, ²karolina.przybysz@ext.uni.lu, ³amina.duisebayeva@ext.uni.lu.

Abstract. *This study presents a comprehensive investigation of the influence of wire mesh geometry (wire diameter and pitch) on bubble entrapment in wire mesh sensors (WMS) applied to gas–liquid flow diagnostics. A combination of CFD simulations and experimental tests was employed to identify the critical balance between surface tension and buoyancy forces that governs bubble retention*

on the sensor. The findings establish optimization criteria for WMS design aimed at minimizing bubble entrapment and improving the accuracy of multiphase flow measurements.

Keywords: multiphase flow; wire mesh sensor; bubble entrapment; CFD simulation; experimental validation; design optimization.

Introduction. Wire mesh sensors (WMS) are an intrusive, tomographic tool to observe multiphase flow behavior at a channel's cross-section [1, 2]. WMS can capture and resolve multiphase flow patterns by measuring electrical conductivity and, more recently, capacitance with a grid of crisscrossing wires placed in a fluid. It applies only to two-phase flow where the two phases have significantly different electrical properties. Examples of such flows are water vapor or air bubbles in a vertical column of water [3, 4]. The WMS applications are centered on gas-liquid flow measurement [5–9]. These sensors consist of two perpendicular planes of parallel wires (Fig. 1).

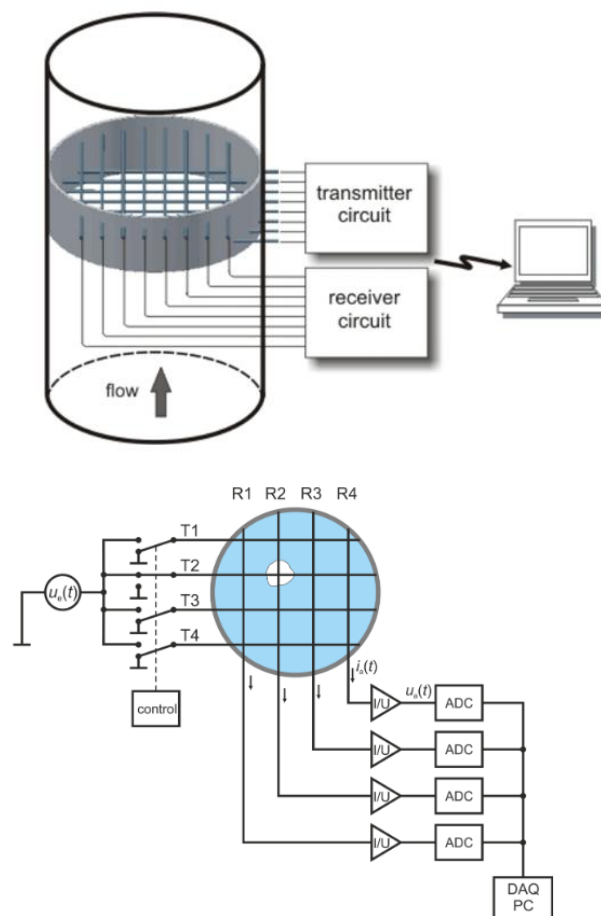


Figure 1 – WMS working principle

The transmitter wires emit electric pulses. A current, proportional to the fluid resistivity, flows to the receiver wires. It means that if the cross-section point of the wire is momentarily surrounded by an electrically conductive fluid, such as water, the received pulse will have a high value. In contrast, when the crossing point of the wires is surrounded by fluid, for which electric conductance can be approximated to be 0, the receiver will receive a low-value signal [10, 11]. The crossing points are arranged in a square grid, Figure 1, and by combining the data from each, WMS can reconstruct detailed

images of the phase distribution across the flow cross-section [12, 13]. Figure 2 shows an example of a single bubble passing the 16 x 16 WMS.

Bubble entrapment in WMS poses a significant challenge for accurate multiphase flow measurements in various industrial applications [3, 14]. The issue of bubble entrapment often undermines the accuracy and reliability of the acquired data, particularly in flows with low void fractions. Recent advancements in sensor design have sought to address this issue by modifying the geometric and structural parameters of WMS, nonlinearity corrections, and improved electronic circuit design [12]. However, the complex interplay between these parameters and flow dynamics remains insufficiently explored. Most studies focus on operational principles and measurement techniques, leaving a gap in understanding how to optimize WMS design to minimize bubble entrapment.

Therefore, **the main objective of this work** is to study the interaction between structural parameters and WMS performance and to identify optimal design criteria that reduce the probability of bubble entrapment and thus improve the accuracy of flow measurements.

Main part. The research combines CFD simulations with experimental validation. CFD model developed in ANSYS Fluent using the Volume of Fluid (VOF) method to resolve gas–liquid interfaces. Both surface tension and buoyancy forces were considered. The $k-\omega$ turbulence model was applied for low-Reynolds-number regimes. Geometry: vertical channel with 34 mm diameter; wire diameters of 0.125 and 0.2 mm; transverse pitches of 1 and 2 mm; vertical pitch 1.6 mm. Bubble sizes of 3.5, 5 and 7 mm were studied at velocities of 0.054–0.113 m/s.

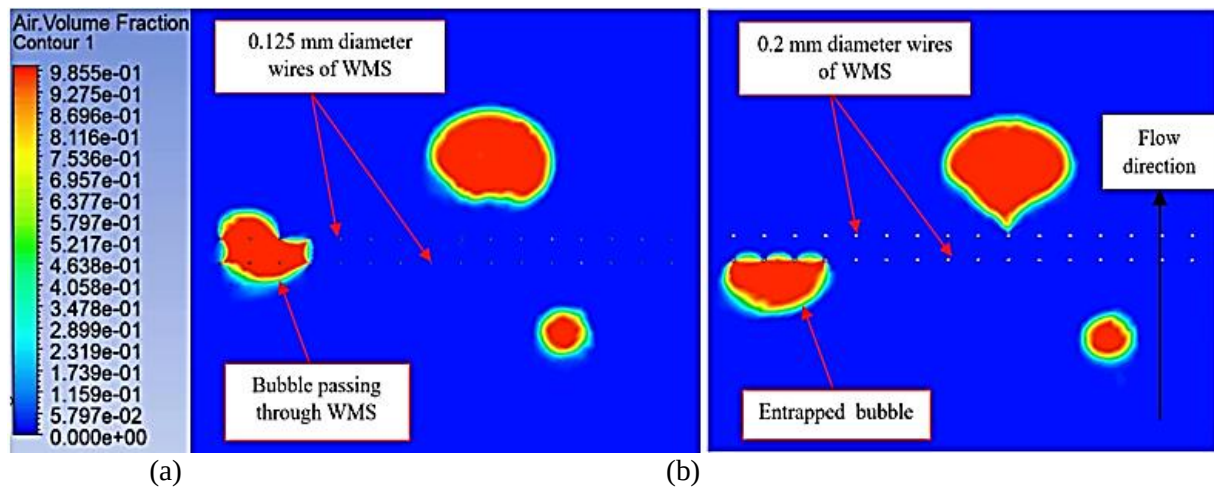


Figure 2 – Simulation results (a) Air bubble passing through WMS with 0.125 mm wire diameter and 2 mm wire spacing (b) Air bubble entrapped on WMS with 0.2 mm wire diameter and 2 mm wire spacing

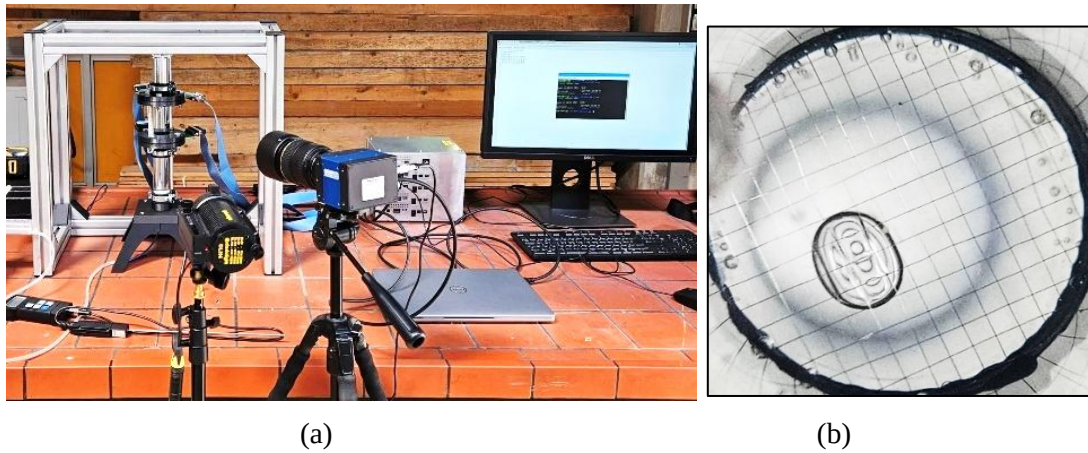


Figure 3 – a) WMS test facility; b) air bubble entrapped on WMS

Experiments were conducted in a 34 mm vertical glass channel equipped with two WMS units (Figure 3). Bubbles were generated using a syringe pump and recorded with a high-speed camera synchronized with the WMS data acquisition system. Bubble sizes ranged from 4.5 to 7.8 mm at velocities of 0.25–0.3 m/s, with water temperatures of 21.5 °C, 40.7 °C and 61.2 °C.

Results and Discussion. The CFD simulations demonstrated that medium-sized bubbles, approximately 5 mm in diameter, were most prone to entrapment, as surface tension forces dominated over buoyancy. Smaller bubbles, around 3.5 mm, were generally able to pass through the mesh, though their contribution to the void fraction was often underestimated. Larger wire diameters were shown to significantly increase the likelihood of entrapment, particularly when combined with smaller spacing, whereas increased water temperature reduced surface tension and facilitated bubble passage. The addition of inlet water velocity further decreased entrapment probability.

Experimental observations were in strong agreement with the simulations. At 21.5 °C, bubbles in the 5–6.5 mm range were frequently trapped, while at 40.7 °C, entrapment was reduced to only some medium-sized bubbles. At 61.2 °C, no entrapment was observed. Furthermore, the experiments revealed that bubbles slowed down while crossing the mesh, with the slowdown being most pronounced for larger bubbles and for sensors constructed with thicker wires.

Entrapment occurs when the surface tension force F_s exceeds the buoyancy force F_b . These forces can be expressed as follows:

$$F_s = \sigma L \cos \theta F_b = \rho_g V_b g$$

where σ is the surface tension coefficient of water (temperature-dependent), L is the wetted perimeter of the wire, θ is the contact angle, ρ_g is the density of gas (air), V_b is the bubble volume, and g is the gravitational acceleration. For optimal design, we require that $F_b > F_s$, ensuring that bubbles can escape rather than being trapped.

An empirical relation was derived for optimal wire diameter:

$$d_w^{opt} = f(D_b, \sigma, \rho, T).$$

Using experimental and simulation data, we derive an empirical relationship for the optimal wire diameter d_w that prevents entrapment as follows:

$$d_w \leq \sqrt{2\sigma / \rho_g g D_b}$$

where D_b is bubble diameter, σ is the surface tension coefficient, ρ is the density, and T is the temperature. The model provides threshold estimates for wire sizes that minimize entrapment.

Conclusions. The study has shown that the geometric parameters of wire mesh sensors, in particular wire diameter and spacing, exert a decisive influence on bubble entrapment in multiphase flows. Both CFD simulations and experiments confirmed that small transverse pitches relative to bubble size and the use of larger wire diameters considerably increase the probability of bubble capture due to surface tension forces, whereas thinner wires and wider spacing promote bubble passage and thus measurement accuracy. Increasing water temperature was also found to reduce bubble entrapment by lowering surface tension, while low bubble velocities were associated with a greater tendency for entrapment.

Based on these findings, several design recommendations can be made. For small bubbles of 3–5 mm, thin wires of 0.125 mm with 2 mm spacing are preferable, while for larger bubbles of 7 mm and above, a wire diameter of 0.2 mm can be applied, provided that pitch spacing is adjusted to minimize entrapment risk. For high-temperature applications above 40 °C, thinner wires are recommended due to reduced surface tension effects.

Overall, the results provide clear evidence that optimizing WMS geometry improves the accuracy of multiphase flow measurements. Future work should extend the analysis to additional design parameters, such as vertical pitch, and to a wider range of flow conditions, including variable bubble sizes, different liquid properties, and 3D effects. Such research will broaden the applicability of WMS technology in industrial settings and enhance its reliability in complex flow environments.

References

- [1] Prasser, H-M., Arnd Böttger und Jochen Zschau. "A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows." *Flow measurement and instrumentation* 9, no. 2 (1998): 111-119.
- [2] Prasser, H-M., Danilo Scholz, and Cornelius Zippe. "Bubble size measurement using wire-mesh sensors." *Flow measurement and instrumentation* 12, no. 4 (2001): 299-312.
- [3] Zaruba, Alexandr, Eckhard Krepper, H-M. Prasser, and BN Reddy Vanga. "Experimental study on bubble motion in a rectangular bubble column using high-speed video observations." *Flow Measurement and Instrumentation* 16, no. 5 (2005): 277-287.
- [4] Perez, V. Hernandez, B. J. Azzopardi, R. Kaji, M. J. Da Silva, M. Beyer, and U. Hampel. "Wisp-like structures in vertical gas-liquid pipe flow revealed by wire mesh sensor studies." *International Journal of Multiphase Flow* 36, no. 11-12 (2010): 908-915.
- [5] Peña, HF Velasco, and O. M. H. Rodriguez. "Applications of wire-mesh sensors in multiphase flows." *Flow measurement and instrumentation* 45 (2015): 255-273.
- [6] Richter, S., M. Aritomi, H-M. Prasser, and R. Hampel. "Approach towards spatial phase reconstruction in transient bubbly flow using a wire-mesh sensor." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, no. 5 (2002): 1063-1075.
- [7] Hampel, U., J. Otahal, S. Boden, M. Beyer, E. Schleicher, W. Zimmermann, and M. Jicha. "Miniature conductivity wire-mesh sensor for gas-liquid two-phase flow measurement." *Flow Measurement and Instrumentation* 20, no. 1 (2009): 15-21.

- [8] Pietruske, Heiko, and Horst-Michael Prasser. "Wire-mesh sensors for high-resolving two-phase flow studies at high pressures and temperatures." *Flow Measurement and Instrumentation* 18, no. 2 (2007): 87-94.
- [9] Da Silva, M. J., S. Thiele, L. Abdulkareem, B. J. Azzopardi, and U. Hampel. "High-resolution gas-oil two-phase flow visualization with a capacitance wire-mesh sensor." *Flow Measurement and Instrumentation* 21, no. 3 (2010): 191-197.
- [10] Prasser, Horst-Michael, Matthias Beyer, Thomas Frank, Suleiman Al Issa, Helmar Carl, Heiko Pietruske, and Peter Schütz. "Gas-liquid flow around an obstacle in a vertical pipe." *Nuclear Engineering and Design* 238, no. 7 (2008): 1802-1819.
- [11] Omebere-Iyari, N. K., B. J. Azzopardi, D. Lucas, M. Beyer, and H. M. Prasser. "The characteristics of gas/liquid flow in large risers at high pressures." *International Journal of Multiphase Flow* 34, no. 5 (2008): 461-476.
- [12] de Assis Dias, Felipe, Philipp Wiedemann, Eckhard Schleicher, Marco Jose da Silva, and Uwe Hampel. "Improvement of wire-mesh sensor accuracy via adapted circuit design and integrated energy loss measurement." *Measurement Science and Technology* 33, no. 8 (2022): 084002.
- [13] Da Silva, M. J., E. Schleicher, and U. Hampel. "Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions." *Measurement Science and Technology* 18, no. 7 (2007): 2245.
- [14] Xiong, Jinbiao, Hao Xie, Sijia Du, and Xu Cheng. "Experimental measurement of bubbly two-phase flow in a 4x4 rod bundle with wire mesh sensor." *Applied Thermal Engineering* 218 (2023): 119294.

I. Dolganov, K. Przybysz, A. Duisebayeva.

Optimization of wire-mesh sensors for multiphase flow measurement with extended capabilities

This study presents a comprehensive investigation of the influence of wire mesh geometry (wire diameter and pitch) on bubble entrapment in wire mesh sensors (WMS) applied to gas-liquid flow diagnostics. A combination of CFD simulations and experimental tests was employed to identify the critical balance between surface tension and buoyancy forces that governs bubble retention on the sensor. The findings establish optimization criteria for WMS design aimed at minimizing bubble entrapment and improving the accuracy of multiphase flow measurements.

Keywords: multiphase flow; wire mesh sensor; bubble entrapment; CFD simulation; experimental validation; design optimization.

УДК 629.5.03:621.438:662.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОХІМІЧНИХ МОДУЛІВ
ОБРОБКИ ПАЛИВА ЗА РАХУНОК УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ВИКИДІВ У
ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ**

Чередніченко О. К., д. т. н., проф.; Жмурченко Л. О., аспірант, Національний

університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

lzhmurchenko@gmail.com

Анотація. У роботі розглянуто термохімічні модулі обробки палива як засіб підвищення загальної енергоефективності відновлюваних та суднових енергетичних систем шляхом утилізації скидного тепла. Наведено аналітичні залежності, приклади інтеграції систем і показано, що гібридні конфігурації типу «газифікація-ORC» можуть забезпечувати ККД понад 80 %. Проаналізовано інтеграцію газотурбінних двигунів з системами рекуперації тепла та термохімічними реакторами у складі гібридних енергетичних комплексів, з акцентом на

зменшення викидів та підвищення ефективності у суднових застосуваннях. Отримані результати підтверджують перспективність подальшого розвитку адаптивних термохімічних технологій для морської та промислової енергетики.

Ключові слова: термохімічні процеси; утилізація тепла; гібридні енергетичні системи; газифікація; ORC-цикл; газотурбінні установки; енергоефективність; суднова енергетика.

Вступна частина. Зростання енергетичних потреб у поєднанні з екологічними викликами вимагає впровадження нових технологій утилізації енергоресурсів. Одним з ефективних напрямів є використання термохімічних

процесів перетворення біомаси та вуглеводневих палив із застосуванням технологій рекуперації скидного тепла від енергетичних установок – зокрема, суднових і газотурбінних систем [1, 2, 11]. Згідно з вимогами Міжнародної морської організації (ІМО 2050), суднова енергетика має зменшити викиди парникових газів щонайменше на 50 % до 2050 року. Це зумовлює необхідність упровадження низьковуглецевих технологій, серед яких термохімічна утилізація тепла та синтез-газові системи є одними з найперспективніших рішень [3, 4, 12, 14].

Ціль дослідження. Підвищення енергоефективності та екологічної безпеки термохімічних модулів за рахунок комплексної утилізації теплових викидів і використання їх в енергетичних системах морського транспорту та промислових об'єктів.

Основна частина

1. Формалізація процесів

Коефіцієнт енергетичної ефективності установки визначається як:

$$\eta = (Q_{\text{корисне}} / Q_{\text{вхідне}}) \times 100 \, \%.$$

Рекупераційна потужність димових газів:

$$Q_{\text{рекуп}} = \dot{m}_{\text{газ}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{out}}).$$

При використанні ORC або турбіни з ефективністю $\eta_{\text{ел}}$:

$$P_{\text{ген}} = \eta_{\text{ел}} \cdot Q_{\text{рекуп}},$$

де η – коефіцієнт корисної дії установки, %; $Q_{\text{корисне}}$ – корисна теплова або електрична енергія, кДж або кВт·год; $Q_{\text{вхідне}}$ – теплота, яка міститься в паливі, кДж; $Q_{\text{рекуп}}$ – теплова енергія, рекуперована з відхідних газів, кДж/с; $\dot{m}_{\text{газ}}$ – масова витрата відхідних газів, кг/с; c_p – питома теплоємність газу, кДж/(кг·К); T_{in} , T_{out} – температура газу до та після рекуперації, °С; $P_{\text{ген}}$ – потужність, яка генерується з рекуперованого тепла, кВт; $\eta_{\text{ел}}$ – ККД перетворення теплової енергії в електричну (ORC або турбіна), %.

Формули базуються на методиках, наведених у працях [5, 7, 8].

2. Застосування у кораблебудуванні

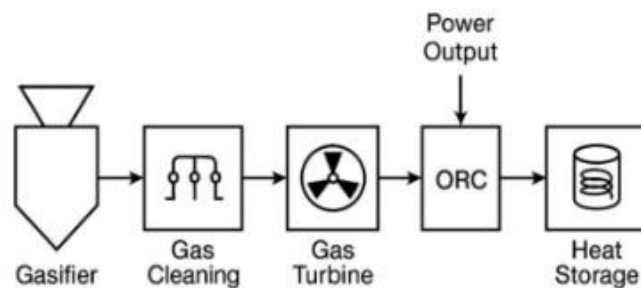
У суднобудівній галузі термохімічні модулі можуть бути джерелом автономного теплопостачання для господарських систем судна, блоком рекуперації скидного тепла газотурбінних двигунів або елементом гібридних енергетичних комплексів у поєднанні з ORC-турбінами, тепловими насосами та фотоелектричними системами.

3. Інтеграція з газотурбінними установками

Синтез-газ, отриманий у процесі термохімічного перетворення, може бути частково використаний як паливо газотурбінних двигунів [4, 10]. Це дозволяє знизити питомі витрати базового палива, стабілізувати параметри потоку в турбіні та отримати додаткову потужність без збільшення викидів. Приклад розрахунку: $\dot{m}_{\text{газ}} = 1,0 \text{ кг/с}$, $c_p = 1,1 \text{ кДж/(кг·K)}$, $\Delta T = 200 \text{ K}$. $Q_{\text{рекуп}} = 220 \text{ кВт}$, $\eta_{\text{ел}} = 0,12$, отже $P_{\text{ген}} \approx 26,4 \text{ кВт}$. Проведені розрахунки підтверджують коректність застосованих залежностей і узгоджуються з відомими теоретичними та експериментальними даними [1–5]. Порівняння показує, що отримане значення генерованої потужності $P_{\text{ген}} = 26,4 \text{ кВт}$ відповідає теоретичним межам для установок аналогічного класу з рекуперацією тепла (20–30 кВт при $\eta_{\text{ел}} = 0,10\text{--}0,15$). Це підтверджує адекватність моделі та достовірність методики оцінювання енергетичної ефективності.

4. Комплексна архітектура

Gasifier + Gas Cleaning + Gas Turbine + ORC + Heat Storage – приклад системи з багаторівневим використанням енергії: газифікація біомаси або вуглеводнів, очищення газу, спалювання в турбіні, рекуперація тепла та додаткова генерація зберігання енергії [7, 8, 9, 13]. Загальний ККД таких систем може перевищувати 80–85 %, що суттєво перевищує показники традиційних схем [11, 12]. Схематичне зображення системи представлено на рис. 1.



Energy System Scheme

Рис. 1. Energy System Scheme — Integrated thermochemical energy recovery system / Інтегрована система термохімічного відновлення енергії [7, 8, 11].

Пояснення компонентів комплексної архітектури

Gasifier – Газифікатор. Газифікатор є основним елементом системи термохімічного перетворення палива. У ньому відбувається розкладання біомаси, вугілля або вуглеводневих відходів при високих температурах (800–1000 °C) у середовищі з обмеженим доступом кисню. Результатом є утворення синтез-газу (CO , H_2 , CH_4) з теплою згоряння 4–12 МДж/м³, який може бути використаний як паливо для турбін або котлів.

Gas Cleaning – Очищення газу. Очищення синтез-газу необхідне для видалення механічних (золи, пилу) та хімічних (смол, H_2S , CO_2) домішок. Процес зазвичай включає: циклонне або інерційне відділення твердих частинок; конденсаційне охолодження для видалення

смолю; фільтрацію та хімічну нейтралізацію шкідливих сполук. Отриманий газ стабільного складу подається в газову турбіну для згоряння.

Gas Turbine – Газова турбіна. Газова турбіна виконує перетворення хімічної енергії очищеного синтез-газу у механічну та електричну. Основні етапи: спалювання газу у камері згоряння; розширення гарячих газів у турбіні; обертання вала електрогенератора. Вихлопні гази мають високу температуру (400–600 °C), тому використовуються для рекуперації тепла в системі ORC.

ORC – Organic Rankine Cycle (органічний цикл Ренкіна). Ця система перетворює низько- та середньотемпературне тепло з вихлопних газів турбіни на електроенергію. Замість води застосовуються органічні робочі рідини (ізобутан, пентан), які киплять при нижчих температурах. Цикл ORC включає: нагрівання та випаровування робочої речовини; розширення у мікротурбіні; конденсацію і повторне стискання. Завдяки цьому утилізується до 20 % теплової енергії, яка інакше втрачалася б у довкілля.

Heat Storage – Система акумулювання тепла. Служить для накопичення надлишкової енергії та вирівнювання теплових коливань. Основні типи систем: водяні або гліколеві резервуари; фазозмінні матеріали (PCM), що зберігають тепло під час фазового переходу; термохімічні акумулятори, де тепло запасається в результаті зворотної реакції. Отримане тепло може використовуватись для опалення, гарячого водопостачання або попереднього підігріву палива. Загальна взаємодія системи. Комплексна установка працює за принципом замкненого енергетичного циклу: Паливо → Газифікація → Очищення → Турбіна (електрика + тепло) → ORC → Акумуляція → Повторне використання тепла. Таке поєднання забезпечує коефіцієнт використання енергії понад 80–85 % та дозволяє ефективно реалізувати утилізацію теплових викидів у суднобудівній, промисловій та енергетичній галузях.

Незважаючи на високу ефективність запропонованої архітектури, її практичне застосування на судах має певні обмеження, пов'язані з габаритами, масою та складністю обслуговування енергетичних блоків. Для суднової енергетики доцільним є використання **компактних модульних термохімічних систем**, інтегрованих безпосередньо у контур газотурбінних або дизельних енергетичних установок. Зокрема, перспективними є рішення із застосуванням **мікро-ORC систем** потужністю 20–50 кВт, **твердих сорбентів** для термохімічного зберігання тепла та **регенеративних каталізаторів** для допалювання синтез-газу. Такі установки можуть бути розміщені в енергетичних відсіках сучасних **газотурбінних суден, нафтоналивних танкерів і допоміжних суден технічного флоту**, забезпечуючи підвищення паливної ефективності без зміни основного компонування машинного відділення.

Отримані результати можуть бути використані для проектування гібридних суднових енергетичних установок, модернізації систем утилізації тепла газотурбінних двигунів та створення модульних ORC-блоків для автономних об'єктів. Реалізація запропонованих рішень

дозволить знизити питомі витрати палива на 10–15 % і скоротити викиди CO₂ до 20 %, що підтверджує їх високу практичну цінність для морської та промислової енергетики.

Висновки. 1. Інтеграція термохімічних модулів з рекупераційними системами дає змогу суттєво підвищити загальну енергоефективність суднових і промислових енергетичних комплексів. 2. Використання синтез-газу як допалювального палива в газотурбінних двигунах знижує викиди та економить паливо. 3. Рекуперація скидного тепла за допомогою ORC- або теплоаккумуляційних систем забезпечує додаткову потужність і стабільність роботи систем. 4. Комплексні гібридні рішення мають перспективу впровадження у суднобудуванні, енергетиці та аграрному секторі. 5. Подальші дослідження передбачають моделювання термохімічних процесів у середовищах CFD (Computational Fluid Dynamics) та оптимізацію схем рекуперації тепла з використанням елементів штучного інтелекту для адаптивного керування гібридними установками [11, 12].

Список скорочень

ORC – Organic Rankine Cycle (органічний цикл Ренкіна); ГТД – газотурбінний двигун; ККД – коефіцієнт корисної дії; CFD – Computational Fluid Dynamics (програмні системи CFD це, наприклад, ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL Multiphysics тощо).

Список літератури

- [1] Cherednichenko, O., Serbin S. (2018). Analysis of efficiency of the ship propulsion system with thermochemical recuperation of waste heat. *J. Marine. Sci. Appl.* 17, 122–130.
- [2] Cherednichenko, O., Serbin, S. Termoximichni texnologiyi dlya energetychnykh moduliv plavuchykh ob'ektiv naftogazovydobutku ta suden-gazovoziv. Monograph. Torubara V. V., Mykolaiv, 2020.
- [3] Cherednichenko, O. (2019). Efficiency analysis of methanol usage for marine turbine power plant operation based on waste heat chemical regeneration. *Problemele Energeticii Regionale*, 1, 102–111.
- [4] Cherednichenko, O., Serbin, S., Dzida, M. (2019). Application of thermo-chemical technologies for converging of associated gas in diesel-gas turbine installations for oil and gas floating units. *POLISH MARITIME RESEARCH*, 3(103), Vol. 26.
- [5] Cherednichenko, O., Mitienkova, V. (2020). Analysis of the impact of thermochemical recuperation of waste heat on the energy efficiency of gas carriers. *J. Marine Sci. Appl.* 19(1), 72–82.
- [6] API. (2013). Carbon Content, Sampling, and calculation. American Petroleum Institute, API TR 2572.
- [7] Akman, M., Ergin, S. (2019). An investigation of marine waste heat recovery system based on organic Rankine cycle under various engine operating conditions. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*.
- [8] Lyu, L., et al. (2023). Energy, Exergy and Environmental Analysis of ORC Waste Heat Utilization from a Marine Main Engine. *MDPI*.
- [9] Hwang, D. J. (2023). A study on the design of Waste Heat Recovery Unit (WHRU) for ships using ORC systems.
- [10] Tian, Z., et al. (2020). Thermo-economic analysis and optimization of a combined ORC / LNG cold energy / dual-fuel marine engine waste heat utilization system.
- [11] Miller, T., et al. (2024). Waste Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency and Emission Reduction. *MDPI Energies*.
- [12] Bittencourt, F. L. F., et al. (2025). Waste-to-energy from marine biomass and processing: thermochemical routes and valorization. *Renewable Energy Advances*.
- [13] Gao, Y., et al. (2023). Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Operating Conditions and Feedstock. *ACS Omega*.

[14] Begum, Y. A., et al. (2024). A review on waste biomass-to-energy: pathways, challenges, and opportunities. RSC Advances.

ENHANCEMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMOCHEMICAL FUEL PROCESSING MODULES THROUGH WASTE HEAT UTILIZATION IN ENERGY COMPLEXES

Cherednichenko O. K., Doctor of Technical Sciences, Professor; **Zhmurchenko L. O.**, PhD Student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
lzhmurchenko@gmail.com

Abstract. *The paper examines thermochemical fuel processing modules as a means to enhance the overall energy efficiency of renewable and marine energy systems through waste heat utilization. Analytical dependencies and examples of system integration are presented, demonstrating that hybrid configurations of the "gasification-ORC" type can provide an efficiency of over 80%. The integration of gas turbine engines with heat recovery systems and thermochemical reactors within hybrid energy complexes is analyzed, with a focus on emission reduction and efficiency improvement in marine applications. The obtained results confirm the viability of further developing adaptive thermochemical technologies for the marine and industrial energy sectors.*

Keywords: thermochemical processes; waste heat utilization; hybrid energy systems; gasification; ORC; gas turbine installations; energy efficiency; marine power engineering.

УДК 004.032.26:621.438

ГІБРИДНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА – СУЧАСНИЙ ІНСТРУМЕНТ АНАЛІЗУ ТА ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІНИ

Савушкін В. В., начальник науково-дослідної лабораторії
АТ «НВКГ «Зоря»-«Машпроект», аспірант кафедри турбін¹
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Україна, м. Миколаїв
¹vvsavushkin.science@gmail.com

Анотація. *Сучасні нейронні мережі є ефективним інструментом для моніторингу, аналізу та прогнозування стану (вібраційного, теплового тощо) елементів та вузлів газотурбінних двигунів. Вони дозволяють в режимі реального часу обробляти великі масиви даних від датчиків, виявляючи складні та неочевидні залежності. Цей підхід дає змогу точно передбачати температурні навантаження та попереджувати критичний перегрів, що підвищує надійність та ресурс роботи газотурбінного двигуна.*

Ключові слова: машинне навчання, телеметрія, аналіз температури, CNN, FNN, виявлення аномалій, прогнозування, реальний час.

Вступна частина. Експлуатація робочих лопаток (РЛ) турбіни високого тиску (ТВТ) газотурбінного двигуна (ГТД) в умовах екстремальних температур вимагає високоточних методів моніторингу та прогнозування їх теплового стану. Традиційні методи інтерполяції точкових вимірів від термодатчиків часто недостатні для реконструкції складних просторових

розподілів температури, що призводить до неможливості своєчасної ідентифікації локальних зон перегріву. На сьогодні згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Network (CNN)) довели свою ефективність для аналізу просторових даних, зокрема для задач теплового картування. Однак викликом залишається інтеграція різнорідних даних: окрім просторової інформації з датчиків, критично важливими є скалярні параметри, такі, як тиск та витрата повітря охолодження або температура на вході та швидкість потоку тощо, які безпосередньо впливають на розподіл температури по поверхні об'єкта дослідження.

У цій роботі доводиться, що найбільш перспективним підходом є використання не окремих CNN-моделей, а їх комбінацій з іншими архітектурами. Саме гібридні моделі, такі, як CNN + повнозв'язна мережа (Fully-Connected Network (FNN)), дозволяють одночасно враховувати як просторові закономірності, так і фізичні параметри [1] різноманітних систем та контурів ГТД. У роботі розглянуто принципи побудови таких комбінованих архітектур, проаналізовано їх переваги та недоліки, а також представлено результати їх застосування для передбачення температурних полів і автоматизованої діагностики стану лопаток.

Мета роботи – розробка та обґрунтування ефективності гібридних архітектур нейронних мереж на основі комбінації згорткових нейронних мереж (CNN) з повнозв'язними шарами (FNN) для високоточної реконструкції теплових карт та прогнозування температурних полів РЛ ТВТ ГТД.

Основна частина. Згорткові нейронні мережі – це спеціалізований клас нейронних мереж, розроблений для ефективної обробки даних зі сітковою структурою, таких як зображення, теплові карти чи будь-які двовимірні масиви даних. Основна перевага CNN полягає в здатності автоматично виявляти просторові залежності та ієрархічні особливості в даних. Проста архітектура CNN мережі відображена на рис. 1.

Завданням CNN є трансформація вхідного тензора (наприклад, зображення, даних від термопар чи оптичного пірометра тощо) у фінальний тензор (в нашому випадку – теплову карту РЛ) шляхом послідовної обробки через серію згорткових шарів. Кожен згортковий шар застосовує фільтри для виявлення ієрархії ознак – від локальних температурних градієнтів до складних теплових аномалій. Отримані проміжні тензори-ознаки потім інтегруються у повнозв'язних шарах для формування фінального прогнозу (наприклад, вектор характеристик для класифікації або регресії). Таким чином, CNN реалізує послідовність функцій-перетворень, які крок за кроком виділяють та комбінують просторові залежності у вихідних даних.

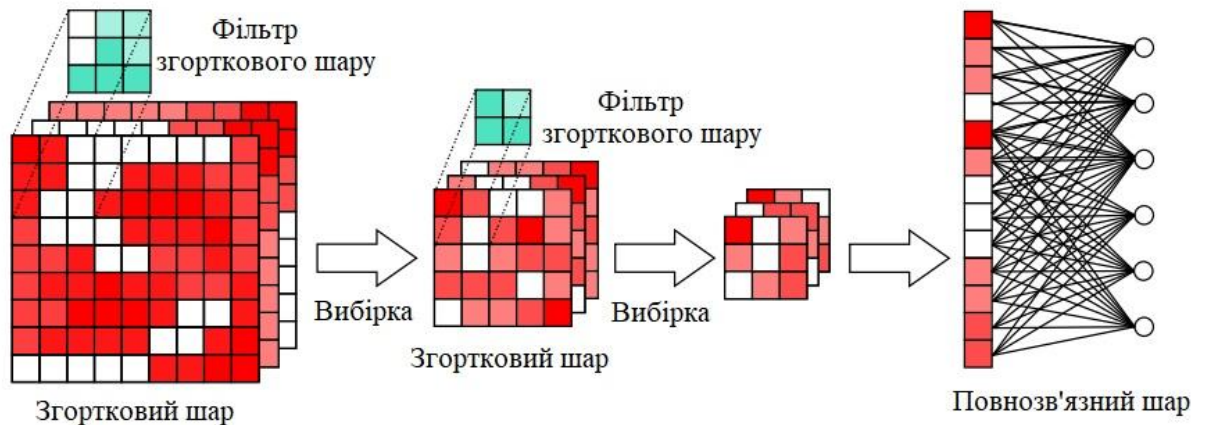


Рисунок 1 – Проста архітектура CNN мережі [2]

У спрощеному розумінні CNN мережі працюють із зображеннями, які побудовані на основі отриманих даних від різноманітних датчиків. Тобто, якщо температура поверхні лопатки турбіни високого тиску вимірюлась контактними термопарами, то на базі отриманих даних від термопар можна побудувати зображення – теплову карту. Кожна теплова карта – зображення з кольоровими градієнтами, де колір відповідає температурі. Маючи велику кількість таких зображень можна сформувати первинний згортковий шар. Фільтри в кожному згортковому шарі виявляють абстрактні ознаки (краї, текстури, градієнти), причому набір фільтрів є однаковим для всіх зображень у межах одного шару, але різним для різних шарів мережі. Фільтри першого шару виявляють прості ознаки але фільтри другого шару (і так далі) вже інші – вони комбінують ознаки з першого шару (попередніх шарів) для виявлення складніших структур. Кожний наступний згортковий шар більш детально аналізує теплові структури (наприклад, зони переходу температури між точками вимірювання термопарами). Їх може бути скільки завгодно, відповідно до «глибини» дослідження зображень. Повнозв'язний шар якраз і виконує функцію класифікації усіх залучених «тензорів»-зображень (наприклад, на класи: норма, передперегрів, перегрів) формуючи певну ймовірність.

Але, звісно, що температуру поверхні лопатки не можна розглядати як окремий об'єкт без урахування чинників, які спричинили зміну цієї температури (нагрів чи охолодження). І таких чинників чимало. Головними з них можна виділити:

- температура на вході в ТВТ;
- швидкість потоку газу;
- тиск повітря охолодження лопатки;
- температура повітря охолодження лопатки;
- витрата повітря охолодження лопатки.

Таким чином, зрозуміло, що температура поверхні лопатки змінюються від зміни вказаних параметрів і для формування прогнозу температурного стану лопатки необхідно навчити нейронну мережу будувати зв'язок між зовнішніми параметрами і фактично вимірюною

температурою поверхні РЛ. І в розрізі використання CNN мережі, на перший погляд, не зовсім зрозуміло як це робити. Саме тому рекомендується використовувати окремо FNN, що дозволить інтегрувати зовнішні параметри в модель аналізу теплового стану лопатки.

FNN працює таким чином, що кожен з її вхідних параметрів взаємодіє з усіма іншими, таким чином виявляючи закономірності і будуючи вихідний набір параметрів, як це робить і повнозв'язний шар CNN [3]. Приклад архітектури FNN зображено на рис. 2.

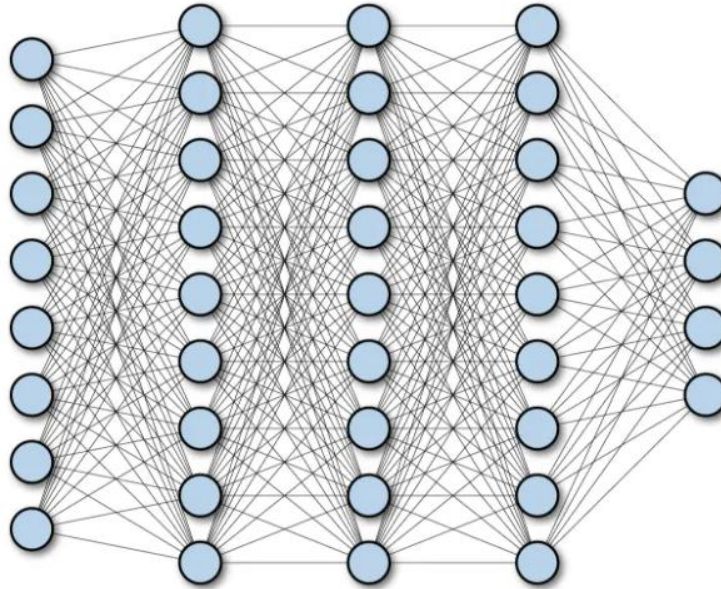


Рисунок 2 – Архітектура FNN мережі [4]

Отже, поєднавши обидва ці повнозв'язні шари можливо створити загальний вектор (див. залежність (1)), який буде оброблятися за принципом FNN та знаходити закономірності між усіма зовнішніми параметрами та безпосередньо вимірними значеннями температури на поверхні лопатки:

$$CNN + FNN = \begin{Bmatrix} T_{in}^n \dots \\ P_{cool}^n \dots \\ T_{cool}^n \dots \\ G_{cool}^n \dots \\ T_{bl}^n \dots \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

де T_{in} – температура на вході в турбіну високого тиску, P_{cool} – тиск повітря охолодження T_{cool} – температура повітря охолодження, G_{cool} – витрата повітря охолодження, T_{bl} – температура поверхні лопатки.

Таке поєднання дасть змогу аналізувати температурні поля не лише методами просторової регресії, а в комплексі з каузальними факторами, що детермінують тепловий стан лопатки. Це перетворює модель з інструменту інтерполяції даних на інструмент фізико-інформованого прогнозування, здатного враховувати причинно-наслідкові зв'язки між експлуатаційними параметрами та тепловими розподілами.

Зрозуміло, що подібні моделі мають свої переваги та недоліки, а саме:

1. Переваги:

- комплексний аналіз (модель одночасно враховує просторові температурні розподіли (через CNN) та фізичні параметри роботи турбіни (через FNN));
- мережа CNN + FNN виявляє причинно-наслідкові зв'язки між експлуатаційними параметрами та тепловими полями;
- комбінація різних типів даних дозволяє краще прогнозувати поведінку системи в нових умовах;
- модель самостійно виявляє складні нелінійні залежності, які важко описати аналітичними методами;
- можливість роботи з різними типами вхідних даних – від зображень до скалярних параметрів.

2. Недоліки:

- складність архітектури, яка потребує ретельного проєктування взаємодії між CNN та FNN компонентами;
- необхідні значні набори даних як теплових карт, так і експлуатаційних параметрів;
- навчання гібридної моделі вимагає більших ресурсів ніж окремі мережі (чим більше параметрів, тим більше зв'язків необхідно будувати між ними та шукати певні закономірності);
- важко зрозуміти, які саме фактори найбільше впливають на прогноз через складну взаємодію компонентів;
- велика кількість параметрів збільшує ймовірність перенавчання, особливо при обмежених даних.

Висновки. 1. Проведене дослідження продемонструвало потенціал ефективного застосування гібридних архітектур нейронних мереж для теплового аналізу робочих лопаток турбіни високого тиску.

2. Запропонована методика поєднання згорткових нейронних мереж (CNN) та повнозв'язних мереж (FNN) дозволяє подолати обмеження традиційних методів інтерполяції та окремих нейромережевих підходів.

3. Ключовим результатом роботи є демонстрація архітектури, здатної інтегрувати різномірні дані: просторові теплові розподіли від термодатчиків та скалярні експлуатаційні параметри (температура на вході, тиск охолодження, витрата повітря тощо). Це забезпечує перехід від простої реконструкції температурних полів до фізико-інформованого прогнозування з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків.

4. Незважаючи на складність реалізації та потребу в значних обчислювальних ресурсах, запропонований підхід відкриває нові можливості для оптимізації конструкції турбін, підвищення їх надійності та скорочення витрат на експериментальні дослідження. Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію методики до роботи в реальному часі та її впровадження в промислові системи телеметричного моніторингу.

Список літератури

- [1] Altice, B., Nazario, E., Davis, M., Shekaramiz, M., Moon, T. K., Masoum, M. A. S. (2024). Anomaly detection on small wind turbine blades using deep learning algorithms. *Energies*, 17, 982.
- [2] Monbroussou, L., Landman, J., Wang, L., Grilo, A., Kashefi, E. (2025). Subspace preserving quantum convolutional neural network architectures. *Quantum Science and Technology*, 10, 025050.
- [3] Kortag, U. (2025). Artificial intelligence-based stress prediction for rotor blisk in gas turbine engines. *Journal of Aviation Research*, 7(2), 149-176.
- [4] Mahajan, P. Fully Connected vs Convolutional Neural Networks. Retrieved from <https://medium.com/swlh/fully-connected-vs-convolutional-neural-networks-813ca7bc6ee5>.

Savushkin V.

Hybrid neural network – a modern tool for analysing and predicting the thermal condition of turbine blades

Contemporary neural networks are an effective tool for monitoring, analysing, and predicting the condition (vibration, thermal, etc.) of gas turbine engine components and assemblies. They enable real-time processing of large data sets from sensors, revealing complex and non-obvious dependencies. This approach, for example, makes it possible to accurately predict temperature loads and prevent critical overheating, which increases the reliability and service life of gas turbine engines.

Keywords: machine learning; telemetry; temperature analysis; CNN; FNN; anomaly detection; prediction; real time.

УДК 621.431:532.5

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ОХОЛОДЖУВАЧІВ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ДВЗ

О. А. Гогоренко, канд. техн. наук, доцент¹, **А. В. Немченко**, аспірант²
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

¹ oleksiy.gogorenko@gmail.com, ² andrii.nemchenko@nuos.edu.ua

Анотація. У роботі представлено інноваційні рішення для автоматизації вимірювань теплотехнічних, гідравлічних і аеродинамічних параметрів охолоджувачів наддувного повітря (ОНП) із моделюванням специфічних режимів роботи. Запропонована методика базується на використанні автоматизованої системи збору та обробки експериментальних даних, сучасного програмного забезпечення і лабораторного стенду. Результати досліджень підтверджують підвищення точності вимірювань та ефективність автоматичного контролю параметрів теплоносіїв. Наукова новизна полягає у впровадженні інтегрованої системи, що поєднує сучасні датчики з програмною обробкою даних. Практична значимість полягає в можливості оптимізації конструкцій ОНП та розробці сучасних систем моніторингу для наукових і промислових потреб.

Ключові слова: експериментальний стенд, автоматизація, охолоджувач наддувного повітря, поверхня теплообміну, датчики.

Вступна частина. Ефективність сучасних двигунів внутрішнього згоряння залежить від характеристик повітря, що надходить до камери згоряння [1]. У цьому контексті охолоджувачі наддувного повітря виступають важливим елементом, який сприяє підвищенню потужності агрегату та зменшенню витрат пального. Аналіз теплотехнічних, гідравлічних і аеродинамічних властивостей ОНП є необхідністю для технічного вдосконалення їх конструкцій [2]. Водночас традиційні методи експериментального дослідження, що передбачають ручний збір даних, мають низку недоліків – зокрема, високу трудомісткість, обмежену точність та значні часові витрати, що ускладнює отримання достовірної емпіричної інформації [3]. Це зумовлює потребу в оновленні дослідницьких стендів шляхом впровадження автоматизованих вимірювальних систем, які забезпечать точне фіксування параметрів, скоротять тривалість експериментів і підвищать надійність отриманих результатів завдяки використанню сучасних апаратних і програмних засобів.

Ціль роботи – створення та інтеграція сучасного апаратно-програмного рішення, спрямованого на автоматизацію процесу вимірювань на наявному лабораторному стенді, призначеному для експериментального вивчення характеристик охолоджувачів наддувного повітря.

Основна частина. Модернізація лабораторного стенда, призначеного для дослідження поверхні теплообміну охолоджувача наддувного повітря, виконана за рахунок встановлення додаткових датчиків для вимірювання вологості повітряного потоку та впровадження автоматизованої системи реєстрації параметрів тиску на стенді, та запис даних на ПК. Принципова схема модернізованого стенда наведена на рис. 1

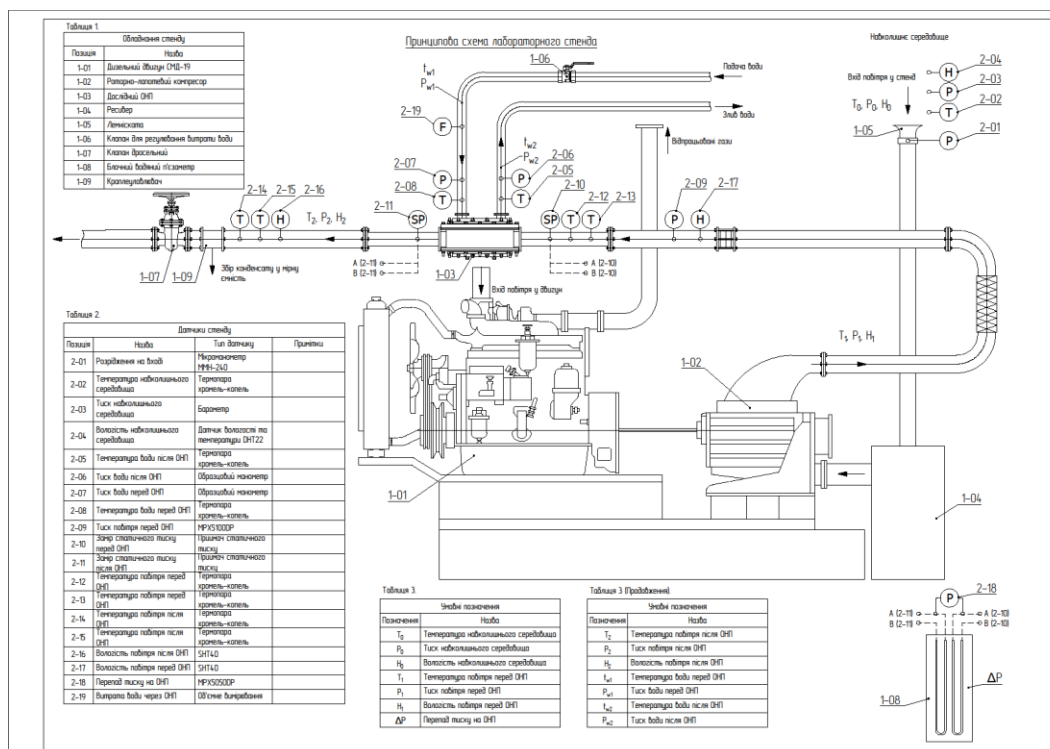


Рисунок 1 – Принципова схема лабораторного стенда

Стенд, розроблений на базі лабораторії кафедри ДВЗ, У та ТЕ НУК, дозволяє відтворювати умови роботи поверхні теплообміну, максимально наближені до реальних. Він забезпечує незалежне регулювання параметрів теплоносіїв у широкому діапазоні та точне вимірювання основних характеристик. До базової конфігурації, орієнтованої на дослідження сухого теплообміну, додано обладнання для аналізу процесів охолодження повітря з вологовипадінням.

Стиснене повітря подається на поверхню теплообміну за допомогою роторно-лопатевого компресора 1-02, який приводиться в дію дизельним двигуном СМД-19 1-01. Технічні характеристики двигуна і компресора дозволяють створювати тиск у межах 20...160 кПа при витраті повітря 0,1...0,5 кг/с. Температура повітря перед входом в ОНП досягає 110...130 °С. Регулювання витрати здійснюється шляхом зміни частоти обертання компресора та налаштування дросельного клапана 1-07.

Вимірювання температури реалізовано за допомогою системи хромель-копелевих термопар, сигнали з яких зчитуються восьмиканальним приладом «ОВЕН» УКТ38-Щ4, а передача даних на комп'ютер здійснюється через адаптер «ОВЕН» АС-2. Витрата повітря фіксується за допомогою звукозвучного пристрою (лемніска) 1-05, встановленого на вході в стенд, а падіння тиску – мікроманометром 2-01.

Параметри навколишнього середовища контролюються за допомогою комплексу датчиків. Тиск повітря вимірюється барометричним датчиком BMP280 2-03 (рис. 2) з точністю $\pm 0,2$ Па [4].



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд датчику BME280

Температура навколишнього середовища визначається однією з термопар системи 2-02.

Вологість повітря вимірюється у трьох точках: у навколишньому середовищі (2-04), перед ОНП (2-17) та після нього (2-16). У всіх випадках застосовано датчики типу SHT40 (рис. 3), які характеризуються високою швидкістю та широким діапазоном вимірювань: температура від -40 до $+125$ °C з точністю $\pm 0,2$ °C, вологість від 0 до 100 % з точністю $\pm 1,8$ % [5].



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд датчика типу SHT40 у стандартному корпусі

Для вимірювання вологості перед і після ОНП сенсори монтуються в корпусі охолоджувача 1-03 у спеціальних направляючих трубках (рис. 4) із використанням ущільнювальних сальників (рис. 5).

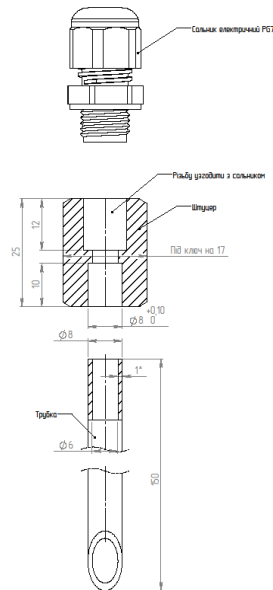


Рисунок 4 – Корпус датчика вологості

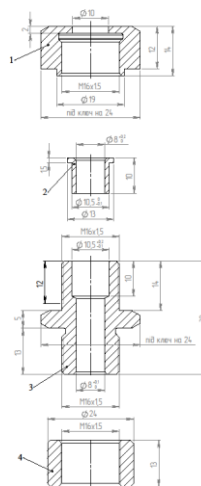


Рисунок 5 – Сальник датчика вологості

Абсолютний тиск перед ОНП визначається за допомогою електронного диференціального датчика MPX5100DP 2-09 (рис. 6), який вимірює різницю між тиском у повітропроводі та атмосферним тиском, а отримані значення додаються до показників барометра. Для перевірки даних паралельно встановлено зразковий манометр.

Перепад тиску на ОНП фіксується блочним водяним п'єзометром 1-08. Для цього в повітряному потоці на вході та виході з охолоджувача встановлено приймачі статичного тиску 2-10 і 2-11. Паралельно до системи підключено диференціальний датчик MPX5050DP 2-18 (див. рис. 6), який дозволяє реєструвати перепад тиску з точністю $\pm 2,5\%$ [6].



Рисунок 6 – Зовнішній вигляд датчиків MPX5100DP та MPX5050DP

Тиск води перед і після ОНП вимірюється зразковими манометрами 2-06 і 2-07, а показники фіксуються фотокамерою. Витрата води контролюється витратоміром YF-DN50-S (2-19), регулюється клапаном 1-06 і підтримується сталою протягом експерименту. Оскільки параметр не змінюється, постійний запис не здійснюється; для зчитування використовується універсальний контролер потоку рідини (рис. 7).



Рисунок 7 – Зовнішній вигляд універсального контролеру потоку рідини

Витратомір YF-DN50-S (рис. 8) забезпечує вимірювання у діапазоні 10...200 л/хв з точністю $\pm 3\%$. Зчитування даних з нього виконується за допомогою згаданого контролера.



Рисунок 8 – Зовнішній вигляд витратоміра YF-DN50-S

Дані з електронних датчиків (окрім термопар) передаються на комп'ютер через контролер на базі Arduino Nano. Аналогові показники фіксуються фотокамерою з часовою синхронізацією, що дозволяє при обробці даних зіставляти параметри, отримані в один і той самий момент часу.

На рис. 9 представлено принципову схему підключення датчиків. До контролера під'єднано барометр BMP280, датчики вологості SHT40 (через мультиплексор TCA9548A для

уникнення конфлікту I2C-адрес) та диференціальні датчики тиску MPX5100DP і MPX5050DP (через модуль на базі мікросхеми ADS1115).

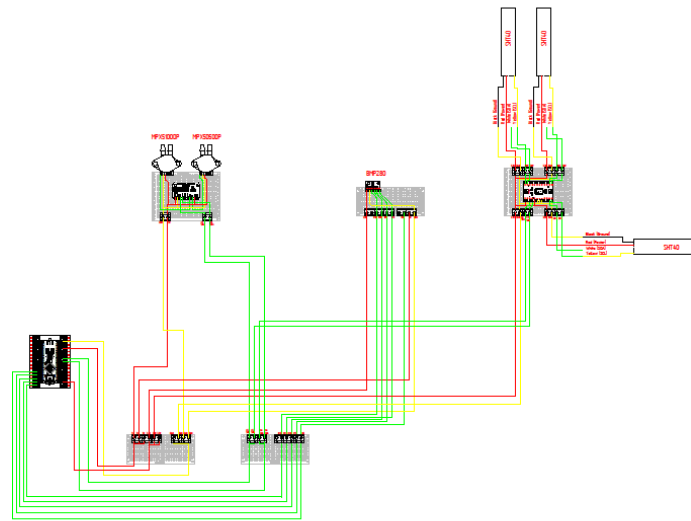


Рисунок 9 – Принципова схема підключення датчиків

Для обробки сигналів розроблено програму в середовищі Arduino IDE [7], яка враховує калібрувальні коефіцієнти кожного датчика. Запис оброблених даних на ПК здійснюється за допомогою програми Serial Port Monitoring, яка зчитує інформацію з COM-порту та зберігає її у текстовому файлі для подальшого аналізу в Excel. Приклад структури даних наведено на рис. 10. Аналогові показники додатково фіксуються фотокамерою з прив'язкою до часу.

24 15:48:49	00:00:02.0315098	Атмосферний тиск	Температура повітря	Вологість повітря	Температура перед ОНП	Вологість перед ОНП	Температура за ОНП	Вологість за ОНП	Тиск перед ОНП	Опір ОНП
24 15:48:49	00:00:02.1905608	101.18	32.65	54.40	106.62	22.56	65.11	22.72	153.77	17.91
24 15:48:50	00:00:03.3034041	101.21	32.68	54.49	106.66	22.55	65.13	22.73	153.70	17.89
24 15:48:51	00:00:04.4165486	101.20	32.67	54.56	106.69	22.58	65.15	22.70	153.82	17.85
24 15:48:52	00:00:05.5294540	101.20	32.68	54.60	106.74	22.56	65.15	22.77	153.89	17.92
24 15:48:53	00:00:06.6423857	101.20	32.67	54.68	106.77	22.61	65.18	22.78	153.74	17.92
24 15:48:54	00:00:07.7553767	101.20	32.69	54.66	106.82	22.58	65.22	22.80	153.69	17.93
24 15:48:55	00:00:08.8683548	101.19	32.68	54.62	106.86	22.51	65.23	22.74	153.74	17.93
24 15:48:56	00:00:09.9811948	101.19	32.70	54.61	106.86	22.60	65.27	22.66	153.70	17.83
24 15:48:58	00:00:11.0942180	101.19	32.71	54.54	106.94	22.55	65.27	22.72	153.64	17.84
24 15:48:59	00:00:12.2070341	101.19	32.72	54.43	106.96	22.57	65.28	22.77	153.65	17.92
24 15:49:00	00:00:13.3199575	101.19	32.70	54.32	107.00	22.59	65.30	22.76	153.71	17.89
24 15:49:01	00:00:14.4333003	101.19	32.71	54.31	107.04	22.57	65.31	22.72	153.89	17.85
24 15:49:02	00:00:15.5457802	101.19	32.73	54.27	107.04	22.56	65.32	22.73	153.86	17.94
24 15:49:03	00:00:16.6594054	101.19	32.71	54.25	107.07	22.51	65.36	22.67	153.83	17.92
24 15:49:04	00:00:17.7720765	101.18	32.73	54.29	107.12	22.58	65.36	22.59	153.85	17.90
24 15:49:05	00:00:18.8848130	101.18	32.71	54.28	107.13	22.49	65.40	22.60	153.78	18.00
24 15:49:06	00:00:19.9976765	101.18	32.73	54.39	107.21	22.57	65.44	22.72	153.80	17.88
24 15:49:08	00:00:21.1108190	101.18	32.73	54.43	107.24	22.57	65.48	22.73	153.79	17.90
24 15:49:09	00:00:22.2238631	101.18	32.75	54.52	107.28	22.55	65.46	22.68	153.73	17.88
24 15:49:10	00:00:23.3369842	101.18	32.74	54.51	107.34	22.55	65.52	22.64	153.71	17.95
24 15:49:11	00:00:24.4498098	101.18	32.74	54.55	107.38	22.46	65.52	22.72	153.61	17.90
24 15:49:12	00:00:25.5624227	101.18	32.77	54.60	107.41	22.52	65.54	22.71	153.91	17.97
24 15:49:13	00:00:26.6753683	101.18	32.77	54.61	107.45	22.51	65.58	22.68	153.72	17.90
24 15:49:14	00:00:27.7887492	101.18	32.77	54.60	107.54	22.52	65.59	22.67	153.74	17.87
24 15:49:15	00:00:28.9015584	101.18	32.77	54.60	107.56	22.50	65.63	22.60	153.78	17.96
24 15:49:17	00:00:30.0144908	101.18	32.80	54.53	107.62	22.51	65.66	22.52	153.72	17.90
24 15:49:18	00:00:31.1275594	101.18	32.78	54.42	107.65	22.41	65.66	22.54	153.80	17.96
24 15:49:19	00:00:32.2405313	101.18	32.78	54.35	107.67	22.51	65.69	22.51	153.76	17.89
24 15:49:20	00:00:33.3532111	101.18	32.79	54.35	107.71	22.49	65.72	22.52	153.89	17.89
24 15:49:21	00:00:34.4663354	101.18	32.77	54.37	107.77	22.48	65.74	22.49	153.81	17.95
24 15:49:22	00:00:35.5791064	101.18	32.79	54.42	107.80	22.44	65.75	22.48	153.70	17.86
24 15:49:23	00:00:36.6924138	101.18	32.82	54.46	107.82	22.45	65.75	22.62	153.78	17.86
24 15:49:24	00:00:37.8052565	101.18	32.81	54.48	107.86	22.47	65.78	22.60	153.77	17.91
24 15:49:25	00:00:38.9180473	101.18	32.80	54.46	107.92	22.46	65.82	22.59	153.69	17.89
24 15:49:27	00:00:40.0311104	101.18	32.80	54.47	107.95	22.45	65.82	22.53	153.78	17.91
24 15:49:28	00:00:41.1440847	101.18	32.80	54.50	107.99	22.49	65.88	22.57	153.75	17.96

Рисунок 10 – Приклад подання інформацію при записі показників

Висновки. В результаті роботи було створено та реалізовано сучасний апаратно-програмний комплекс, призначений для автоматизованого вимірювання теплотехнічних, гідравлічних і аеродинамічних характеристик охолоджувачів наддувного повітря на лабораторному стенді. Розроблена система, побудована на базі контролера Arduino Nano, забезпечує синхронізований збір експериментальних даних з частотою 1 Гц, що дає змогу

досліджувати як усталені, так і перехідні режими роботи ОНП, включаючи процес вологовипадіння. Впровадження автоматизації дозволило знизити вплив суб'єктивних чинників, скоротити тривалість експериментів та забезпечити зручний формат збереження даних для подальшої обробки. Модернізація стенда створила гнучку платформу для його подальшого розвитку. Запропонований комплекс може слугувати основою для побудови сучасних систем моніторингу та автоматизованих дослідницьких установок, орієнтованих на вдосконалення конструкцій теплообмінного обладнання та підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння.

Список літератури

1. Наливайко, В. С., Тимошевський, Б. Г., & Ткаченко, С. Г. (2015). *Суднові двигуни внутрішнього згоряння*. Вид. Торубара В. В.
2. Мошенцев, Ю. Л., Гогоренко, О. А., & Мінчев, Д. С. (2020). *Системи охолодження та теплообмінні апарати двигунів внутрішнього згоряння*. Вид. Торубара В. В.
3. Крот, О. Ю., Коробко, Б. О., Крот, О. П., & Вірченко, В. В. (2023). *Експериментальні методи досліджень*. НУПП.
4. Bosch Sensortec. (2021). *BMP280: Digital pressure sensor* (Data Sheet BST-BMP280-DS001-26).
5. Sensirion. (n.d.). *SHT40-AD1P-R2: 4th generation, high-accuracy, ultra-low-power, 16-bit relative humidity and temperature sensor*. <https://sensirion.com/products/catalog/SHT40-AD1P-R2>
6. NXP Semiconductors. (2018). *MPX5100 series: Integrated silicon pressure sensor* (Data Sheet MPX5100, Rev. 13).
7. Arduino. (n.d.). *Software*. <https://www.arduino.cc/en/software/>
8. Kuppan, T. (2013). *Heat exchanger design handbook* (2nd ed.). CRC Press.
9. Lienhard, J. H., V, & Lienhard, J. H., IV. (2024). *A heat transfer textbook* (6th ed.). Phlogiston Press.
10. Kazi, M. S. N. (Ed.). (2023). *Heat transfer: Fundamentals, enhancement and applications*. IntechOpen.
11. Tubular Exchanger Manufacturers Association. (2019). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (10th ed.).

Gogorenko O., Nemchenko A.

Improvement of the data collection system in research on supercharged air coolers for ship engines

The study presents innovative solutions for automating the measurement of thermotechnical, hydraulic, and aerodynamic parameters of charge air coolers (CAC) under simulated specific operating conditions. The proposed methodology is based on the use of an automated data acquisition and processing system, modern software tools, and a laboratory test bench. Experimental results confirm improved measurement accuracy and the effectiveness of automated control of heat carrier parameters. The scientific novelty lies in the implementation of an integrated system that combines advanced sensors with software-based data processing. The practical significance is reflected in the potential for optimizing CAC designs and developing modern monitoring systems for research and industrial applications.

Key words: experimental test bench; automation; charge air cooler; heat transfer surface; sensors.

УДК 629.5.03:62-8

**ІННОВАЦІЙНІ ТЕПЛООБМІННІ ПОВЕРХНІ СУДНОВИХ
УТИЛІЗАЦІЙНИХ КОТЛІВ****В. В. Кузнецов**, д. т. н., професор кафедри¹, **С. А. Кузнецова**, к. т. н., доцент²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**Україна, м. Миколаїв*¹valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua, ²svitlana.kuznetsova@nuos.edu.ua

Анотація. Підвищення теплової ефективності головних малообертових двигунів ускладнило утилізацію теплоти їх відпрацьованих газів. В роботі представлені інноваційні теплообмінні поверхні на основі труб еліптичного перерізу для використання в утилізаційних котлах. Особливістю таких поверхонь є переважаюче зростання інтенсивності тепловіддачі над гідродинамічним опором. Отримано, що їх використання в складі суднових котельних установок в змозі підвищити теплову ефективність суднових енергетичних установок до 3,2% абсолютних в суднових енергетичних установках з системою Waste Heat Recovery System за рахунок загальної економії палива та відповідно знизити рівень шкідливих викидів.

Ключові слова: суднова енергетична установка, ефективність, утилізаційний котел, профільована поверхня нагріву

Вступ. Котельні установки є невід'ємною частиною суднових енергетичних установок. Їх паропродуктивність залежить від призначення та дедвейту судна та може коливатися у межах від 1,5...5,0 т/год для суховантажних суден та балкерів, контейнеровозів до 5,0...20,0 т/год і вище для танкерів [1].

Суднові утилізаційні котли використовувались для забезпечення парою споживачів на ходових режимах роботи судна. Це давало можливість підвищення загальної економічної ефективності роботи енергетичної установки та зниження рівня шкідливих викидів.

Підвищення теплової ефективності головних та допоміжних двигунів знизило можливість використання утилізаційних котлів у складі суднових енергетичних установок. Незважаючи на вимоги ІМО щодо зниження вмісту сірки у паливі [2] перехід від сімейства S до сімейства G двигунів компанії MAN B&W може викликати необхідність підвищення площі поверхні теплопередачі до 33 %, що ускладнить розміщення таких котлів в обмежених просторах машинних відділень енергетичних установок [3]. Таким чином, розробка інноваційних компактних поверхонь суднових утилізаційних котлів є актуальною проблемою.

Результати дослідження. Для вирішення цієї проблеми утилізаційні котли були умовно поділені на дві групи по паропродуктивності – перша – до 5 т/год та друга – вище 5 т/год. До першої групи входять утилізаційні та комбіновані котли, що використовуються на суховантажних судах та балкерах, та контейнеровозах, друга складає тільки утилізаційні – на танкерах та судах, які застосовують системи WHRS – Waste Heat Recovery System. Перша група

може використовуватись на балкерах, суховантажних судах, контейнеровозах, друга – на танкерах та судах, які застосовують системи *WHRS – Waste Heat Recovery System* [4].

Аналіз теплогідравлічної ефективності сучасних поверхонь теплообміну показав можливість її підвищення за рахунок зниження опору форми поверхні теплопередачі. Це може бути реалізовано за рахунок використання поверхонь не круглого поперечного перерізу, так званих тіл, що добре гідродинамічно обтікаються, зокрема еліптичних або плоскоовальних (рис. 1).

Якщо прийняти в якості показника теплогідравлічної ефективності фактор аналогії Рейнольдса [6], то можна констатувати, що коефіцієнт тертя труб зазначеного не круглого перерізу зменшується менше ніж загальний коефіцієнт опору, що в результаті призведе до того, що відношення коефіцієнту тепловіддачі до загального коефіцієнта опору буде зростати. Таким чином загальна теплогідравлічна ефективність поверхні теплопередачі буде підвищуватись.

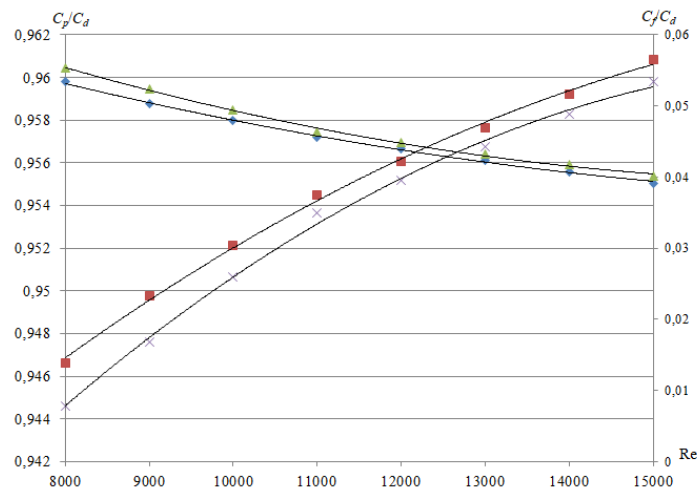


Рисунок 1 – Співвідношення складових коефіцієнту повного опору (C_d) – тиску (C_p) та тертя (C_f) поодинокій труби в залежності від числа Re при однаковому еквівалентному діаметрі поверхні $d_{екв}$ та співвідношенні напівосей a/b : ■ – круг (C_p/C_d ; $a/b=1$); × – еліпс (C_p/C_d ; $a/b=2$); ◆ – круг (C_f/C_d); ▲ – еліпс (C_f/C_d ; $a/b=2$) [5]

В розвиток цього напрямку для зазначеної вище групи котлів паропродуктивністю до 5 т/год було запропоновано гладкі еліптичні поверхні та еліптичні поверхні з контрольованим відривом потоку (рис. 2) [7] з відносними поперечними і повздовжніми кроками відповідно

$\frac{s_1}{d_{екв}} = 1,1 \dots 1,4$ та $\frac{s_2}{d_{екв}} = 1,5 \dots 1,9$, що підвищує ефективність перенесення теплоти на 24...31 % у порівнянні з пучками гладких круглих труб [8].

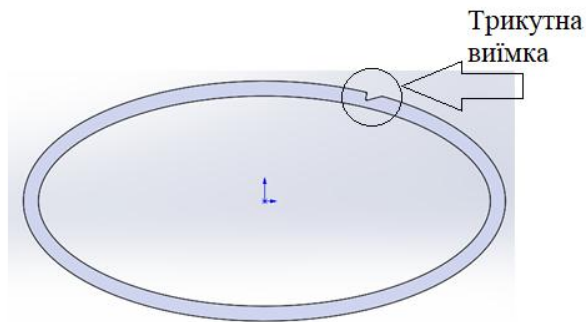


Рисунок 2 – Поперечний переріз гладкої еліптичної поверхні з трикутною виїмкою для контрольованого відриву потоку

Для групи котлів продуктивністю більше 5 т/год запропоновано використання в якості поверхонь теплообміну оребрених еліптичних поверхонь з лунковими системами на ребрах (рис. 3).

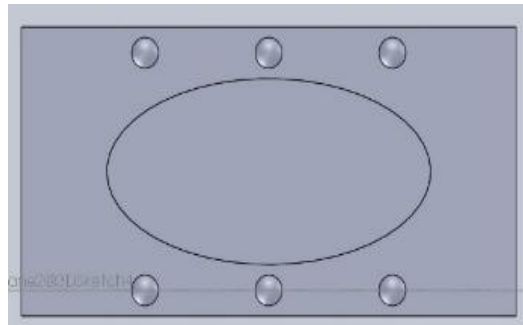


Рисунок 3 – Поперечний переріз оребреної еліптичної поверхні з лунковими системами на ребрах

Використання таких поверхонь з відносними поперечними і повздовжніми кроками відповідно $\frac{s_1}{d_{\text{екв}}} = 1,7 \dots 2,2$ та $\frac{s_2}{d_{\text{екв}}} = 1,3 \dots 1,6$ підвищує ефективність перенесення теплоти на 27...34 % у порівнянні з пучками гладких круглих труб [8].

Загальна оцінка використання запропонованих поверхонь у складі суднових енергетичних установок [8] показала можливість підвищення коефіцієнта корисної дії суднових енергетичних установок до 1,9% абсолютних при використанні першої групи котлів та до 3,2% абсолютних при використанні другої.

Висновки. 1. Підвищення теплової ефективності малообертових дизельних двигунів знизило можливість утилізації теплоти їх відпрацьованих газів та відповідного використання утилізаційних котлів з-за їх високих масогабаритних показників. 2. В якості теплообмінних поверхонь запропоноване використання гладких еліптичних, еліптичних з контрольованим відривом потоку та еліптичних оребрених з лунковими системами на ребрах труб. 3. Використання зазначених поверхонь теплообміну взмозі підвищити ефективність тепловіддачі в пучках труб відповідно від 24...31 до 27...34 % абсолютних у порівнянні з пучками гладких круглих труб зі зниженням масогабаритних показників. 4. Застосування утилізаційних котлів в дослідженими трубами не круглого поперечного перерізу дає можливість підвищення ККД

суднових енергетичних установок від 1,9 до 3,2 % абсолютних при збереженні габаритних показників котла.

Література

- [1]. Significant Ship 2014-2023. URL: https://www.libramar.net/news/significant_ships_series/1-0-140 (дата звернення: 10.09.2025).
- [2]. “MARPOL Annex VI and the Act to Prevent Pollution from Ships (APPS).” URL: <https://www.epa.gov/enforcement/marpol-annex-vi-and-act-prevent-pollutionships-apps>. (дата звернення: 10.09.2025).
- [3]. Project Guides. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/project-guides> (дата звернення: 10.09.2025).
- [4]. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI 2018 URL: <https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf> (дата звернення: 10.09.2025).
- [5]. Fundamentals of fluid mechanics [Text] / B.R. Munson, T.H. Okiishi, W. W. Huebsch, A. P. Rothmayer // John Wiley & Sons, Inc. 2013. – 796 p
- [6]. Халатов, А.А. Узагальнення дослідних даних по фактору аналогії Рейнольдса для інтенсифікаторів теплообміну різних типів [Текст] / А.А. Халатов, А.В. Окішев, В.М. Оніщенко // Пром. Теплотехніка. 2010. Т.32. №5. С. 5–13.
- [7]. Kuznetsov, V., Kuznetsova S. Increasing the Economic Efficiency of Marine Power Plants Using Waste Heat Boilers with Controlled Flow Separation . *POLISH MARITIME RESEARCH*. – 2024. – 3(123). – Vol. 31; pp. 94-101. doi 10.2478/pomr-2024-0039.
- [8]. Кузнецов, В.В. Розвиток науково-технічних основ підвищення ефективності і компактності енергетичних установок інтенсифікацією теплопередачі в їх елементах [Текст] / В.В.Кузнецов // Матеріали XII МНТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», м. Миколаїв, НУК, Україна, 2021. С.30-32

INNOVATIVE HEAT TRANSFER SURFACES OF MARINE WASTE HEAT RECOVERY BOILERS

Kuznetsov V. V., Kuznetsova S.A.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract. *The increase in the thermal efficiency of low-speed main engines has complicated the utilization of the heat from their exhaust gases. The paper presents innovative heat transfer surfaces based on tubes with an elliptical cross-section for use in waste heat boilers. A distinctive feature of such surfaces is a predominant increase in heat transfer intensity compared to hydrodynamic resistance. It has been established that their use as part of marine boiler systems can increase the overall thermal efficiency of ship power plants by up to 3,2 percentage points due to overall fuel savings and, consequently, reduce harmful emissions.*

Key words: marine power plant, efficiency, waste heat boiler, profiled heating surface

Секція № 1. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

УДК 629.5(510)

СУДНОБУДУВАННЯ В КИТАЇ: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Галай А. І.¹

студ. гр.4217зст НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна,
galayannalee@gmail.com

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

Анотація. Китайська державна суднобудівна корпорація (CSSC) є одним з найбільших суднобудівних підприємств у світі. Ця галузь сприяє технологічним інноваціям, розвиваючи автоматизацію, «зелену» енергетику та матеріалознавство, що має широкі наслідки для інших секторів економіки. Діяльність корпорації сприяє розвитку місцевих економік і пов'язаних галузей, зокрема металургії, машинобудування та електроніки.

Ключові слова: технологічні інновації; глобальний суднобудівний ринок; комерційне суднобудування; обладнання суднобудівних заводів.

Актуальність

Суднобудівна промисловість є наріжним каменем світової торгівлі, економічного розвитку та національної безпеки. Як основа міжнародної комерції, вона забезпечує транспортування понад 80 % світової торгівлі за обсягом, з'єднуючи країни та сприяючи ефективному переміщенню товарів по всьому світу [1]. Питання відродження суднобудівної промисловості в Україні є надзвичайно актуальними.

Основна частина

Суднобудівна промисловість відіграє критичну роль у національній обороні, забезпечуючи передові військові судна для гарантування морського суверенітету та безпеки Китаю ([2], Міністерство національної оборони Китаю, 2023). Крім того, ця галузь сприяє технологічним інноваціям, розвиваючи автоматизацію, зелену енергетику та матеріалознавство, що має широкі наслідки для інших секторів ([3], Міністерство науки і технологій Китаю, 2023).

Завдяки різноманітному портфолію, що включає комерційні судна, військові кораблі та офшорне інженерне обладнання, CSSC зміцнила свої позиції як ключовий гравець у глобальному суднобудівному ринку ([4], Офіційний сайт CSSC, 2023), вона є передовим гравцем у сфері технологічних інновацій, у розробці екологічно чистого суднобудування та розумних суден, що

¹ Робота виконана під керівництвом Бондаренка Миколи Степановича, доцента кафедри ЕСЕУ та ТЕ.

відповідає загальній меті Китаю досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року ([5], Міністерство екології та навколишнього середовища Китаю, 2023).

Економічно CSSC робить значний внесок у ВВП та зайнятість у Китаї, маючи верфі у ключових прибережних містах, таких як Шанхай, Далянь та Гуанчжоу ([6], Національне бюро статистики Китаю, 2023).

Ці можливості є необхідними для підтримки глобального флоту та забезпечення довгострокової стійкості морської галузі. На міжнародній арені CSSC конкурує з провідними світовими суднобудівниками, такими як *Hyundai Heavy Industries* і *Mitsubishi Heavy Industries*, зберігаючи сильну присутність на міжнародних ринках і експортує судна в різні країни світу ([9], Китайська рада з просування міжнародної торгівлі, 2023). Її прихильність до інновацій і стійкого розвитку позиціонує компанію як лідера у переході до екологічно чистого суднобудування, з акцентом на розробку енергоефективних суден.

Комерційне суднобудування. CSSC значно розширила свої можливості у виробництві різноманітних типів суден, зокрема 24000 *TEU* контейнеровозів, танкерів для перевезення зрідженого природного газу (*LNG*) та великих круїзних лайнерів. Компанія будує свій другий круїзний лайнер внутрішнього виробництва, *Adora Flora City*, для *Adora Cruises*. Це судно, водотоннажністю 141800 тон і довжиною 341 метр, розраховане на 5232 пасажирів, перевершуючи за розміром і місткістю свого попередника, *Adora Magic City* ([10], журнал *Maritime Executive*).

Військове суднобудування. CSSC відіграє ключову роль у військово-морській обороні Китаю, будуючи передові бойові кораблі для Військово-морських сил Народно-визвольної армії Китаю. Компанія відіграла важливу роль у створенні есмінця типу 055, одного з найбільших і найсучасніших бойових кораблів у світі. Тип 055 має малопомітний дизайн і потужний, добре інтегрований комплекс сенсорів, що підвищує морські можливості Китаю. ([11], *China Maritime Studies Institute*)

Екологічне суднобудування. У відповідь на зростаючий попит на екологічно чисті морські рішення CSSC активно розробляє енергоефективні та маловикидні судна. До новітніх досягнень компанії в суднобудуванні входить виробництво 24 000 *TEU* контейнеровозів, танкерів для перевезення *LNG* та круїзних лайнерів, таких як *Adora Magic City*. Наразі будується другий круїзний лайнер, що підтверджує прагнення CSSC розширювати свій портфель екологічно безпечних суден ([12], *MarineLink journal*).

Обладнання для встановлення судових систем. Одним із найважливіших інструментів у цьому процесі є кранові системи, які сприяють підйому, позиціонуванню та монтажу важких корабельних компонентів.

На верфях CSSC використовується різноманітне кранове обладнання для забезпечення безперебійного встановлення судових систем, зокрема козлові крани, баштові крани та системи підйому суден.

- Козлові крани – такі, як кран вантажопідйомністю 1600 т на верфі *Jiangnan Shipyard*, здатні працювати з вантажами від 100 до понад 1000 т, що робить їх ідеальними для підйому великих суднобудівних секцій, таких як двигуни, генератори та зональні блоки. Вони охоплюють значні площі верфі та оснащені передовими системами управління для точного позиціонування важких вантажів ([13], *Marine Focus on CSI*).

- Баштові крани використовуються для підйому менших компонентів і матеріалів на підвищені робочі зони. Їхня типова вантажопідйомність становить від 10 до 50 тон, а радіус дії може сягати 100 метрів. Висока гнучкість цих кранів дозволяє переміщувати їх у межах суднобудівного майданчика залежно від стадії будівництва ([14], *Marine Insight*, «*Shipyard Cranes: Types and Applications*», 2023).

Для масштабних операцій, таких як ремонт і технічне обслуговування суден, застосовуються системи підйому суден, зокрема плавучі доки та синхронізовані системи підйому. Ці механізми можуть працювати з суднами, що важать тисячі тон, і є важливими для підйому всього судна з води для ремонту чи монтажу нових конструкцій ([15], *DSIC Official Website*, «*Floating Dock Capabilities*», 2023).

- Мобільні крани забезпечують гнучкість і маневреність, пересуваючись територією верфі для допомоги у підйомі менших компонентів та транспортуванні матеріалів. Їхня вантажопідйомність може варіюватися від 50 до 500 т ([16], *Made-in-China, Journal*)

Taisun, розташований у Яньтай, є найпотужнішим краном у світі з вантажопідйомністю 20000 т, що дозволило йому встановити світовий рекорд Гіннеса за найважчий підйом, має висоту 133 метри та розмах 120 метрів. Розроблений компанією *Dalian Huarui Heavy Industry (DHHI)*. *Taisun* використовується для встановлення великих модулів у напівзанурювані платформи та *FPSO*, а також для морських бурових операцій. Він отримав *Woelfel Best Mechanical Engineering Achievement Award* за значний внесок у морську промисловість. встановив світові рекорди для підйомів 20133, 17100 та 14000 т ([18], *World Record Academy*, «*Taisun Crane Achievements*», 2023).

Honghai – найбільший за вантажопідйомністю пересувний кран у світі, здатний піднімати 22000 т. Він був побудований компанією *Honghua Group* у 2014 році в провінції Цзянсу (Китай). Кран має висоту 100 метрів, розмах 124 метри та максимальну висоту підйому 71 метр. Його сталева конструкція важить 11000 т, а загальна маса становить приблизно 14800 т. *Honghai* відіграє важливу роль у суднобудуванні, зокрема у будівництві напівзанурюваних бурових платформ для компаній, таких як *Orion* ([19], *Sevencrane*, «*Honghai Crane: World's Largest Movable Crane*», 2023).

Козлові крани, баштові крани та системи підйому суден відіграють ключову роль у встановленні судових систем на *CSSC Shipyards*. Вони забезпечують ефективну, безпечну та точну роботу з важкими компонентами, що сприяє своєчасному та високоякісному будівництву суден. Завдяки постійному впровадженню інновацій та передових технологій *CSSC* зміцнює свої

позиції у світовій суднобудівній галузі ([4], *CSSC Official Website*, «*Innovations in Shipbuilding*», 2023).

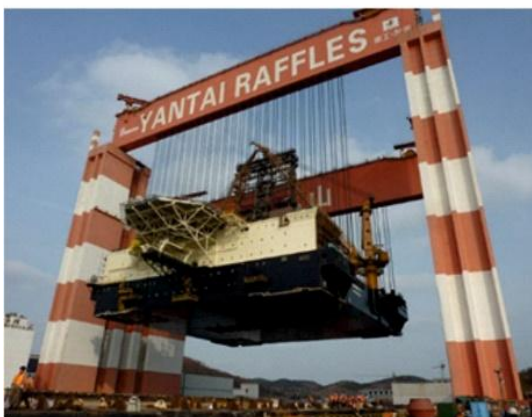


Рис. 1. Кранове обладнання суднобудівних заводів CSSC

Зварювальні системи у суднобудуванні. Зварювання є основним процесом у суднобудуванні, необхідним для з'єднання металевих компонентів з метою забезпечення структурної цілісності суден. На верфях CSSC використовуються як автоматичні, так і ручні зварювальні системи.

Автоматичні зварювальні системи широко використовуються у сучасному суднобудуванні завдяки їхній точності, стабільності та ефективності. До таких систем належать роботизовані зварювальні маніпулятори та комп'ютерно керовані зварювальні апарати. Дугове зварювання під флюсом (SAW) часто застосовується для з'єднання товстих сталевих плит у корпусах суден, що забезпечує високу швидкість нанесення та глибоке проплавлення ([20], *CSSC Wuhan Temo Welding Consumables CO., LTD* та [16]).



Рис. 2. Автоматичні зварювальні системи

Ручні зварювальні системи залишаються незамінними для завдань, які вимагають гнучкості та адаптивності. Досвідчені зварювальники використовують ручне дугове зварювання покритими електродами (*SMAW*), зварювання у захисному газі (*GMAW*) та аргано-дугове зварювання (*TIG*) для виконання складних зварних з'єднань у важкодоступних місцях або на компонентах неправильної форми. Ручне зварювання є особливо важливим під час ремонтних та обслуговуючих робіт, де використання автоматизованих систем може бути недоцільним ([4], Офіційний сайт CSSC, «Зварювальні технології у CSSC», 2023).

Болтові з'єднання та гідравлічні інструменти у суднобудуванні. Болтові з'єднання та гідравлічні інструменти є невід'ємними компонентами у суднобудуванні, які відіграють вирішальну роль у збиранні та фіксації конструкцій суден, машин та систем. Ці методи забезпечують структурну цілісність, безпеку та надійність суден, що робить їх незамінними як на етапах будівництва, так і ремонту. На верфях CSSC використовуються передові техніки болтових з'єднань та гідравлічні інструменти, щоб задовольнити високі вимоги сучасного суднобудування.

Для досягнення точних та надійних болтових з'єднань у суднобудуванні широко використовуються гідравлічні інструменти. Гідравлічні гайковерти та натяжні пристрої застосовуються для забезпечення правильного моменту затягування або натягу болтів. Гідравлічні гайковерти особливо корисні для затягування великих болтів у обмежених просторах, таких як кріплення двигунів або гребні вали, де використання ручних інструментів було б непрактичним ([4], Офіційний сайт CSSC, «Гідравлічні інструменти у суднобудуванні», 2023).

Автоматизовані системи монтажу в суднобудуванні. Автоматизовані системи монтажу революціонізували суднобудівну галузь, підвищуючи ефективність, точність та безпеку під час збирання та встановлення судових компонентів. Ці системи використовують передові технології, такі як робототехніка, штучний інтелект (*AI*) та комп'ютерне проєктування (*CAD*), щоб оптимізувати складні процеси, зменшити людські помилки та підвищити загальну продуктивність. На верфях CSSC автоматизовані системи монтажу є невід'ємною частиною

будівництва сучасних суден ([23], *Engineering Applications of Artificial Intelligence*), [24], *Weben Smart Manufacturing System Shanghai Co., Ltd*).

Одним із ключових застосувань автоматизованих систем монтажу є збирання зональних блоків. Ці попередньо виготовлені секції судна збираються за допомогою роботизованих маніпуляторів та автоматизованих транспортних засобів (*AGV*), які транспортують та розміщують блоки з точністю до міліметра. Такий підхід не лише скорочує час будівництва, але й мінімізує витрати матеріалів та праці.

Іншою важливою сферою, де автоматизовані системи монтажу демонструють високу ефективність, є встановлення трубопроводних та електричних систем. Автоматизовані системи, такі як роботи для монтажу труб та машини для прокладання кабелів, використовуються для встановлення складних мереж труб і кабелів по всьому судну. Ці системи програмуються за допомогою *CAD*-моделей, що дозволяє їм рухатися в обмежених просторах та уникати перешкод з високою точністю.

Автоматизовані системи монтажу також застосовуються для встановлення важкого обладнання, такого як двигуни, генератори та рушійні системи. ([4], Офіційний сайт CSSC, «Автоматизація та інновації», 2023).

Впровадження передових автоматизованих рішень

Зобов'язання CSSC до автоматизації також підкріплюється її співпрацею з *Wärtsilä ANCS* (*Automation, Navigation & Control Systems*) у будівництві круїзного лайнера *Adora Magic City*. *Wärtsilä* надала комплекс автоматизованих рішень, включаючи систему автоматизації та управління *NACOS Platinum Valmatic*, яка контролює різні суднові функції. Ця інтеграція забезпечує безперебійну роботу та моніторинг судових систем, підвищуючи як безпеку, так і ефективність під час встановлення та подальшої експлуатації.

Цей проєкт демонструє, як CSSC використовує передові технології для забезпечення високої якості та надійності своїх суден, зокрема у складних проєктах, таких як круїзні лайнери. Співпраця з *Wärtsilä ANCS* підкреслює стратегічний підхід CSSC до інтеграції інноваційних рішень, що відповідають сучасним стандартам суднобудування.

Стратегічний розвиток інфраструктури

Окрім технологічних досягнень, CSSC інвестувала в інфраструктурні проєкти для підтримки автоматизованих монтажних процесів. Розвиток суднобудівної бази *Changxing* на острові Чансін є яскравим прикладом таких зусиль. Ця передова верфь створена для підвищення технічної майстерності та ефективності Китаю у суднобудуванні, інтегруючи сучасні об'єкти, які підтримують автоматизовані системи монтажу та оптимізують будівельні процеси ([28] Китайська CSSC розпочинає проєкт верфі на острові Чансін).

Китайська державна суднобудівна корпорація затвердила себе як світовий лідер у галузі суднобудування, вносячи значний внесок у комерційне, військове та екологічно чисте суднобудування [42, 43, 44]



Рис. 3. Острівний суднобудівний завод

На своїх передових суднобудівних заводах, CSSC успішно інтегрувала новітні технології, такі як автоматизовані системи монтажу, робототехніка та рішення на основі штучного інтелекту, підвищуючи ефективність, точність та сталість у будівництві суден. Співпраця компанії зі світовими технологічними лідерами, зокрема *Wärtsilä*, ще більше посилила її експертизу в галузі автоматизації, електричних систем та рушійних технологій.

Перспективні напрями розвитку суднобудування в Китаї тісно пов'язані з глобальними тенденціями енергетики, цифровізації, «зеленого переходу» та геополітичної конкуренції. Станом на 2024–2025 роки Китай є світовим лідером за тоннажем побудованих суден, обігнавши Корею та Японію.

Основні перспективні напрямки суднобудування в Китаї

1. Зелене суднобудування (Green Shipbuilding)

Китай інвестує у створення екологічно чистих суден:

- судна на ЗПГ (*LNG-fueled vessels*) – танкери, контейнеровози, балкери;
- судна на метанолі, аміаку та водні (у перспективі після 2030 р.);
- електросудна для внутрішніх вод і коротких морських маршрутів;
- системи *scrubber-free* – зменшення сірчаних викидів.

Китайський лідер *COSCO Shipping* активно замовляє та будує «зелені» контейнеровози (на *LNG*, *methanol-ready*).

2. Цифровізація та автономні судна

Китай розробляє і тестує розумні судна нового покоління:

- цифрові двійники (*Digital twins*) суден і систем;
- автономні навігаційні системи – морські дрони, безекіпажні баржі
- інтеграція штучного інтелекту для логістики та обслуговування;

3. Високотехнологічні військові кораблі

Китай розвиває будівництво:

- авіаносців нового покоління (тип 003 «*Fujian*») з електромагнітними катапультами;
- ескадрених міноносців типу 055 – одних з найсучасніших у світі;
- підводних човнів з новими силовими установками;

Особливість: використання інноваційних енергосистем та електромагнітної зброї.

4. Власні проекти великотоннажних суден

- надпотужні *ULCV*-контейнеровози (*Ultra Large Container Vessel*) – понад 24 000 *TEU*;
- *VLCC*, *VLOC*, *LNG/LPG* – танкери для енергонезалежності.

5. Консолідація та створення «мегаверфей»

Злиття двох державних концернів *CSSC* та *CSIC* у «*China State Shipbuilding Corporation*» створило найбільший у світі суднобудівний гігант.

Найперспективніші напрями суднобудування в Китаї:

1. Екологічні судна (*LNG*, метанол, водень).
2. Цифрові та автономні платформи.
3. Нові типи військових кораблів і авіаносців.
4. Великий тоннаж і власна стандартизація.

Список літератури:

1. China Maritime Safety Administration. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.msa.gov.cn/>
2. Ministry of National Defense of the People's Republic of China. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.mod.gov.cn/>
3. Ministry of Science and Technology of China. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.most.gov.cn/index.html>
4. CSSC Official Website. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.chinaships.com/>
5. Ministry of Ecology and Environment of China. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.mee.gov.cn/>
6. National Bureau of Statistics of China. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.stats.gov.cn/>
7. China Association of the National Shipbuilding Industry. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.cansi.org.cn/>
8. China Ship News. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.zgcb.com.cn/>
9. China Council for the Promotion of International Trade. (n.d.). [*Homepage*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.ccpit.org/>
10. The maritime executive journal. (n.d.). *China Completes Structure for Second Domestically Built Cruise Ship*. Retrieved December 9, 2025, from https://maritime-executive.com/article/china-completes-structure-for-second-domestically-built-cruise-ship?utm_source=https://www.google.com/search?q=chatgpt.com
11. China Maritime Studies Institute. (n.d.). [*Untitled report*]. Retrieved December 9, 2025, from <https://digital->

commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=cmsi-maritime-reports&utm_source=https://www.google.com/search?q=chatgpt.com

12. MarineLink journal. (n.d.). *China Adds Green Shipbuilding to Booming [Sector]*. Retrieved December 9, 2025, from https://www.marinelink.com/news/china-adds-green-shipbuilding-booming-521299?utm_source=https://www.google.com/search?q=chatgpt.com

13. Marine focus on CSI. (n.d.). [Article title unknown]. iMarine News. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.imarinenews.com/18794.html>

14. Marine Insight. (2023). *Shipyard Cranes: Types and Applications*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.marineinsight.com>

15. DSIC Official Website. (2023). *Floating Dock Capabilities*. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.dsic.com.cn>

16. Made-in-China. (n.d.). *China KGW [Product]*. Retrieved December 9, 2025, from <https://luzhouseparator.en.made-in-china.com/product/koXQEOGyAwht/China-KGW->

17. Kongsberg. (n.d.). *Great lift, great leap – Yantai Raffles*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.kongsberg.com/maritime/news-and-events/our-stories/great-lift-great-leap---yantai-raffles/>

18. World Record Academy. (2023). *Taisun Crane Achievements*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.worldrecordacademy.com>

19. SevenCrane. (n.d.). *Honghai Crane: World's Largest Movable Crane*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.sevenindustry.com/info/the-world-s-largest-gantry-crane-79868512.html>

20. CSSC Wuhan Temo Welding Consumables CO., LTD. (n.d.). [News title unknown]. Retrieved December 9, 2025, from <https://en.whm.com.cn/news/4/>

21. World Maritime News. (2023). *Innovations in Shipyard Tools*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.worldmaritimeneews.com>

22. Marine Insight. (2023). *Automation in Shipbuilding*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.marineinsight.com>

23. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. (n.d.). Retrieved December 9, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197623006103>

24. Weben Smart Manufacturing System (SHANGHAI) CO., LTD. (n.d.). [Homepage]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.weben-smart.com/>

25. Wärtsilä. (2017, March 7). *CSSC and Wärtsilä establish new electrical automation joint venture*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.wartsila.com/media/news/07-03-2017-cssc-and-wartsila-establish-new-electrical-automation-joint-venture>

26. Wärtsilä Official Website. (n.d.). [Homepage]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.wartsila.com/>

27. Riviera Maritime Media. (n.d.). *CSSC Wärtsilä opens new Shanghai Neuron Centre to boost cruise shipbuilding*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/cssc-wartsila-opens-new-shanghai-neuron-centre-to-boost-cruise-shipbuilding-26313>

28. Construction Digital. (n.d.). *China's CSSC Begins Shipyard Project on Changxing Island*. Retrieved December 9, 2025, from <https://constructiondigital.com/construction-projects/chinas-cssc-begins-shipyard-project-changxing-island>

29. Collins, G., & Grubb, C. (2008, August). *A Comprehensive Survey of China's Dynamic Shipbuilding Industry* (China Maritime Study 1). China Maritime Studies Institute. https://www.andrewerickson.com/wp-content/uploads/2010/04/China-Maritime-Study-1_China-Shipbuilding-Industry_Collins-Grubb_2008-August.pdf

30. Dalian Shipbuilding Industry Co., LTD. (n.d.). [Homepage]. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.dsic.com.cn/index.htm>

31. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021, April). *Report on China's Shipbuilding Industry and Policies Affecting It*. Retrieved December 9, 2025, from https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/04/report-on-china-s-shipbuilding-industry-and-policies-affecting-it_f15b480d/bb222c73-en.pdf
32. China Association Shipbuilding Industry. (n.d.). [Untitled documents]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.cansi.org.cn/cms/document/show/45.html> та <https://www.cansi.org.cn/cms/document/show/50.html>
33. China Ship Scientific Research Center. (n.d.). [Research description]. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.cssrc.com/kxyj/32.html>
34. Baidu Haokan. (n.d.). [Video 1]. Retrieved December 9, 2025, from <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=11613660705710532843>
35. Zhihu. (n.d.). [Video 2]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.zhihu.com/zvideo/1768289770634207233>
36. Baidu Baijiahao. (n.d.). [Article 3]. Retrieved December 9, 2025, from <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1800182626359079468>
37. Bilibili. (n.d.). [Video 4]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.bilibili.com/video/BV1ki421Y7NE/>
38. Baidu Haokan. (n.d.). [Video 5]. Retrieved December 9, 2025, from <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=15865947542688994053>
39. Baidu Haokan. (n.d.). [Video 6]. Retrieved December 9, 2025, from <https://haokan.baidu.com/v?vid=11195686892412706067&>
40. Baidu Haokan. (n.d.). [Video 7]. Retrieved December 9, 2025, from <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=11230583768525532087>
41. Baidu Haokan. (n.d.). [Video 8]. Retrieved December 9, 2025, from <https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=9064848561548528874>
42. Paluba Media. (n.d.). [Article title unknown]. Retrieved December 9, 2025, from <https://paluba.media/news/43706>
43. Flot. (n.d.). [Book chapter/article]. Retrieved December 9, 2025, from <https://flot.com/publications/books/shelf/reddragon/6/?print=Y>
44. UKR-CHINA. (n.d.). *Китай – судостроительная держава номер один в мире*. Retrieved December 9, 2025, from <https://ukr-china.com/blog/kitaj-sudostroitel'naya-derzhava-nomer-odin-v-mire44>

Shipbuilding in china: prospects for development

Abstract. China State Shipbuilding Corporation (CSSC) is one of the largest shipbuilding companies in the world. This industry promotes technological innovation by developing automation, green energy, and materials science, which has broad implications for other sectors of the economy. The corporation's activities contribute to the development of local economies and related industries, including metallurgy, mechanical engineering, and electronics.

Keywords: technological innovations; global shipbuilding market; commercial shipbuilding; shipyard equipment.

УДК 629.5.03

ПРО ВПЛИВ ФОРМИ ЕЛАСТОМІРНОГО РУШІЯ ТА НАПРЯМКУ ЙОГО ОСЦИЛЯЦІЙНОГО РУХУ НА ВЕЛИЧИНУ ТЯГИ, СТВОРЮВАНОЇ НИМ

Самохвалов В. С., к. т. н., доцент, доцент кафедри теплотехніки¹; **Кобалава Г. О.**, к. т. н., доцент, завідувач кафедри теплотехніки²; **Воїнов О. П.**, д. т. н., професор, професор кафедри теплотехніки³

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

¹ysevoloddsamohvalov@gmail.com, ²g.lavamay@gmail.com, ³voinova_s@yahoo.com

Анотація. Розглянуто вплив форми рушія та напрямку його горизонтального або вертикального осциляційного руху на величину тяги, створюваної ним. Наведено результати експериментальних досліджень тяги, яку створюють макети пропульсивних установок з еластомірними рушіями різної форми, які імітують рух гідробіонтів. Встановлено, що вертикально-осцилюючий трапецієподібний рушій забезпечує найвищу тягу порівняно з іншими типами.

Ключові слова: енергозбереження, екологічна безпека, пропульсивна установка, рушій, осциляційний рух, тяга, еластоміри.

Вступна частина. У сучасному морському транспорті спостерігається підвищений інтерес до альтернативних типів рушіїв, які поєднують високу енергетичну ефективність, маневреність, екологічну безпеку та здатність до енергозбереження. Серед них особливу наукову й практичну цінність становлять біоміметичні системи, що імітують характер руху гідробіонтів, подібних рибам, дельфінам, медузам тощо. Такі рушійні установки забезпечують ефективну роботу навіть за умов складної гідрологічної обстановки, а також характеризуються зниженим рівнем акустичного випромінювання, що є критично важливим при їх застосуванні на підводних платформах наукового, військового або екологічного призначення. Тип коливального руху (горизонтальний або вертикальний) та форма рушія (прямокутна або трапецієподібна) істотно впливають на генеровану ним тягу, що, у свою чергу, визначає загальну ефективність пропульсивної системи.

Ціль роботи: експериментальне вивчення залежності величини тяги, створюваної біоміметичним рушієм, від форми та напрямку його коливального руху, а також встановлення оптимальної конструктивної конфігурації для ефективного функціонування в умовах морського середовища.

Основна частина. Один із ключових компонентів пропульсивної установки становить рушій, від технічно обґрунтованого вибору якого залежить низка експлуатаційних

характеристик: енергоефективність, акустична малопомітність, здатність до проходження акваторій із негарантованими глибинами, а також подолання інших несприятливих зовнішніх чинників.

Рушії, що імітують рухові принципи гідробіонтів, найбільш повно відповідають зазначеним вимогам. Серед них особливе поширення отримали конструкції, що реалізують горизонтально- та вертикально-осцилюючі рухи.

Теоретичні моделі, які пояснюють механізми утворення тягових зусиль у таких типах рушіїв, зокрема, були розвинені українськими науковцями Інституту біології південних морів ще у радянський період. Було висунуто гіпотезу, згідно з якою під час коливальних рухів хвостових плавців з обох їх боків формуються вихори, що обертаються в протилежних напрямках і, взаємодіючи з навколишнім середовищем, виконують функцію своєрідних вальців, які проштовхують тіло гідробіонта вперед.

Вагомим чинником у формуванні тягового зусилля гідробіонтів є різниця тиску, яка виникає на протилежних боках вигнутого хвостового плавця. Однією з цікавих гіпотез є уявлення, за яким у процесі руху хвоста риби в один бік утворюється умовна «гірка», по якій плавець ніби «сповзає» під час руху у зворотному напрямку. При цьому береться до уваги ефект, згідно з яким краплинні рідини за дії імпульсних навантажень проявляють властивості, подібні до твердих тіл [1].

З метою кількісної оцінки тяги, що може генеруватися біоміметичними рушійми з горизонтально- та вертикально-осцилюючим рухом, було виготовлено два діючих експериментальних зразки пропульсивних установок [2, 3]. Основна відмінність між макетами полягала в орієнтації осциляцій рухомої частини рушія: у першому випадку реалізовано горизонтальні коливання, у другому - вертикальні.

Вимірювання тягового зусилля здійснювалося за допомогою динамометра [4, 5]. Маса кожного з макетів становила 2 кг. Як джерело живлення використовувалася акумуляторна батарея з напругою 9 В. Площа поверхні рушія дорівнювала 40 см². Досліджувалися два геометричні варіанти форми рушіїв: прямокутна (сторони 3 см та 13 см) та трапецієподібна (висота 6 см, сторони 5 см і 9 см). Матеріалом для виготовлення рушіїв слугували еластомерні пластини товщиною 2 мм.

Результати випробувань показали, що у випадку вертикально-осцилюючого трапецієподібного рушія [6] спостерігалось максимальне значення тяги 0,3 Н. Заміна його на прямокутний призвела до зниження тягової сили втричі – до 0,1 Н [5].

Для макета з горизонтально-осцилюючим рушієм навпаки, – трапецієподібна форма забезпечувала менше тягове зусилля (0,07 Н), тоді як застосування прямокутної геометрії дозволило підвищити його до 0,1 Н.

Висновки.

Для вертикально-осцилюючих біоміметичних рушіїв виявлено, що збільшення їхньої довжини може призводити до істотного зменшення тягового зусилля, аж до кількарразового зниження ефективності пропульсивної дії.

У випадку горизонтально-осцилюючих рушіїв, навпаки, подовження робочого елемента сприяє зростанню генерованої тяги, що свідчить про потенційне підвищення ефективності таких конструкцій за рахунок оптимізації їх геометричних параметрів.

Література

[1]. Самохвалов В.С., Шостак В.П., Воїнов О.П., Кобалава Г.О. Використання еластомірних матеріалів для пластинчастих рушіїв рухової пропульсивної установки / Матер. XVII міжнар. наук.-практ. конф. "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT - 2025), Одеса, 28-30 травня 2025р.- С. 327 – 329.

[2]. Випробування макету пропульсивної установки з вертикально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtube.com/shorts/9mIE6OGqAkY>. – Назва з екрана.

[3]. Випробування макету пропульсивної установки з горизонтально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtube.com/shorts/9sneDINZqGs?> – Назва з екрана.

[4]. Діючий макет пропульсивної установки з горизонтально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм. Вимірювання тяги [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtube.com/shorts/Nz7CHGMxR6o>. – Назва з екрана.

[5]. Діючий макет пропульсивної установки з вертикально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм. Вимірювання тяги [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtube.com/shorts/oWEVrMen9fk>. – Назва з екрана.

[6]. Випробування макету пропульсивної установки з трапецієподібним вертикально-осцилюючим рушієм. Вимірювання тяги [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://youtube.com/shorts/rNPPohNOLmM?> – Назва з екрана.

ABOUT INFLUENCE OF ELASTOMER PROPELLER SHAPE AND ITS OSCILLATING MOTION DIRECTION ON THRUST AMOUNT CREATED BY IT

Samokhvalov V.S., Associate Professor of Department of Heat Engineering,

Kobalava G.O., Head of Department of Heat Engineering,

Voinov O.P., Professor of Department of Heat Engineering

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National Shipbuilding
University, Kherson, Ukraine

Abstract. *The influence of propeller shape and the direction of its horizontal or vertical oscillatory motion on the magnitude of the thrust created by it is considered. The results of experimental studies of the thrust created by models of propulsive installations with elastomeric propellers of various shapes that simulate the movement of aquatic organisms are presented. It was established that the vertically oscillating trapezoidal propeller provides the highest thrust compared to other types.*

Keywords: *energy saving, environmental safety, propulsive installation, propeller, oscillatory motion, thrust, elastomers.*

УДК 629.5.02:006.76

ANSI STANDARDS FOR SHIPBOARD POWER PLANT DESIGN AND OPERATION

Nalyvaiko V., PhD., Professor¹

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Oliinyk O.²

Student of Higher Education at the Department of Marine Engineering and Power Engineering, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Avdiunin R.³

*Lecturer at the Department of Marine Engineering and Power Engineering
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

¹vasyl.nalyvaiko@nuos.edu.ua; ²alexandroleinik432@gmail.com;

³roman.avdiunin@nuos.edu.ua

Abstract. This report compares the key ANSI-accredited and GOST standards associated with the significant components of marine propulsion systems. For each, the authoritative standards.

The growing attention to increasing global focus on decarbonization, emission reduction (e.g., IMO Net-Zero Framework, FuelEU Maritime), and advanced marine electronics are accelerating the convergence and updating of maritime standards. At the same time, ANSI-aligned systems excel in supporting innovation and international trade.

Keywords: ANSI, GOST, OST, ASME, NFPA, ANAB.

The American National Standards Institute (ANSI) is a private, non-profit organization that administers and coordinates the U.S. voluntary standards and conformity assessment system. Founded in 1918, the Institute collaborates closely with industry and government stakeholders to identify and develop standards- and conformance-based solutions to national and global priorities [1].

The ANSI oversees the creation and dissemination of various standards and measures, including business norms and standards in the United States.

The global maritime industry operates under a complex web of technical standards that impact the design and construction of marine power plants and their certification, international acceptance, safety, reliability, and day-to-day operational management. Among the most influential standardization frameworks are those issued by the ANSI, the CIS GOST system (“State Standard”), and the OST (“Industry standard”) system. These systems embody distinct philosophies, regulatory structures, and

regional legacies, with divergent implications for technical compatibility, certification protocols, global acceptance, and practical shipbuilding applications.

One of the most immediate differences between ANSI and GOST/OST standards in marine power plant systems arises from their fundamental approach to measurements and technical specifications. ANSI, deeply rooted in the American engineering tradition, predominantly uses imperial measurement units such as inches and PSI (pounds per square inch), notably in flange and piping standards like ASME B16.5 and B16.47. In contrast, GOST standards universally apply to the metric system (SI units), such as in GOST 12820-80 and GOST 12821-80 flanges. This divergence leads directly to compatibility challenges:

Without adapters or conversion calculations, ANSI-designed components (e.g., pipe flanges, valves, or pumps) cannot be interchanged with GOST/OST counterparts. For instance, a vessel built initially to GOST piping specifications will typically require retrofitting or conversion to accommodate ANSI-compliant replacement parts, affecting system pressure ratings and maintenance procedures.

Material grades and design specifications also differ: ANSI references American standards such as ASTM A105 for carbon steel and ASTM A182 for stainless steel. At the same time, GOST uses CIS-centric specifications, affecting the choice and availability of raw materials and impacting supply chains.

ANSI standards, particularly when issued by entities such as ASME, IEEE, ASTM, and ABS, enjoy broad international recognition, as they are frequently harmonized with ISO and IEC frameworks. For marine and offshore power plants, this has several outcomes:

Widespread acceptance by global classification societies (IACS members) enables easier port state control passage and multisite vessel operation.

Standards like IEC 61162, ASME BPVC, and marine energy norms (e.g., ANSI/ARESCA 62600-20) facilitate international equipment sourcing and technical exchanges [2].

Furthermore, conformity assessment programs accredited by ANSI, such as through the ANSI National Accreditation Board (ANAB), are signatories to the International Accreditation Forum (IAF) Multi-Lateral Arrangement, reducing certification redundancy and supporting international equipment and service acceptance.

GOST and OST standards are primarily recognized in CIS countries and select regions with historical engineering influence. While GOST has evolved toward partial harmonization with international frameworks, outside this regional cluster, recognition is limited. In most cases:

Vessels or equipment built solely to GOST/OST are not automatically accepted in central international registers without supplementary documentation or re-certification to ISO/IEC/ABS norms (marine engineering context).

Certain conventions, such as MARPOL and SOLAS, establish minimum safety and emissions requirements recognized globally. However, the technical path to compliance with these under GOST-issued rules often requires additional interpretive guidance or bridging documentation.

Thus, shipowners targeting broad, multinational operations typically prefer ANSI/ISO-aligned designs, while those focused on CIS markets choose GOST/OST pathways for smoother local acceptance.

ANSI Approaches to Safety. ANSI's marine power plant safety approach is rooted in redundancy, systematic risk assessment, and fail-safe principles documented in general and highly specialized codes.

The ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), IEEE standards, and ABS Rules define rigorous testing regimes for pressure systems, electrical installations, and control circuits, addressing failure modes such as overload, insulation breakdown, and fire/explosion risks.

Standards such as ASTM F1166-07 focus on ergonomic design criteria and human factors in marine environments, while ASTM F3284-18 and F3256-17 are dedicated to incident reporting and near-miss protocols [3].

Modern ABS and ANSI-aligned codes require emergency shutdowns, physical separation of redundant power buses, vibration and inclination tolerance, and automated safety device integration (e.g., fire detection, insulation resistance monitoring).

GOST/OST Approaches to Safety. The need for ruggedness, operational simplicity, and resilience in demanding or remote environments profoundly influences the GOST/OST corpus.

System design emphasizes robust mechanical construction, prescribed minimum material grade, and resilience to the unique climatic and operational challenges of CIS waters, including ice operations and extreme cold.

In some respects, EMC and electrical safety requirements are more restrictive than Western counterparts, particularly regarding immunity to electrostatic discharges and conducted/radiated interference [4].

Safety is achieved by prescriptive requirements: e.g., GOST 15150-69 specifies operational, storage, and climatic categories; OSTs define best practices for shipboard installations of critical systems.

Notably, modern procedural safety systems (e.g., formalized root cause incident investigation, digital diagnostics integration, continuous monitoring) are less emphasized, with a greater reliance on design simplicity, redundancy, and manual operation protocols.

Technical standards deeply impact component sizing, specification, interoperability, and lifecycle performance:

ANSI/ABS-Designed Systems – Support for modularity (e.g., redundant propulsion windings, separated ring-bus architectures), advanced diagnostics, and optimization for maintenance access and ergonomic operation. Example: ASTM F1166-07 and IEEE-45 facilitate human-centered design and maintenance efficiency.

GOST/OST-Designed Systems – Focus on design-for-durability, over-dimensioning for harsh conditions, and rugged construction, sometimes at the expense of O&M (operations and maintenance)

flexibility. Example: GOST-compliant filter or pump design may emphasize robustness over ease of disassembly or international spare parts availability.

Equipment designed under one system may not be directly replaceable in a vessel built to the other unless hybrid documentation is prepared and dual certification is sought – a significant consideration for fleet managers and shipowners with diverse portfolios.

Maintenance and compliance under ANSI (and aligned international) standards follow structured, verifiable, and often digitized practices:

Planned periodic inspections and condition-based monitoring are codified in operational guidelines (e.g., ASME BPVC.VII, ABS survey requirements) and support documentation, aiding compliance and predictive maintenance.

ANSI-affiliated standards (ASME, IEEE, NFPA, API) applied to components like diesel engines, piping, LNG tanks, electrical generators, and fire suppression systems, shown in Fig. 1.

Maintenance documentation is detailed, multilingual, and globally recognized, supporting international chartering, resale, and operation.

GOST/OST Perspective. Maintenance protocols are typically more manual, with reliance on routine shipboard crew procedures and standard parts stockpiling rather than remote diagnostics or predictive analytics.

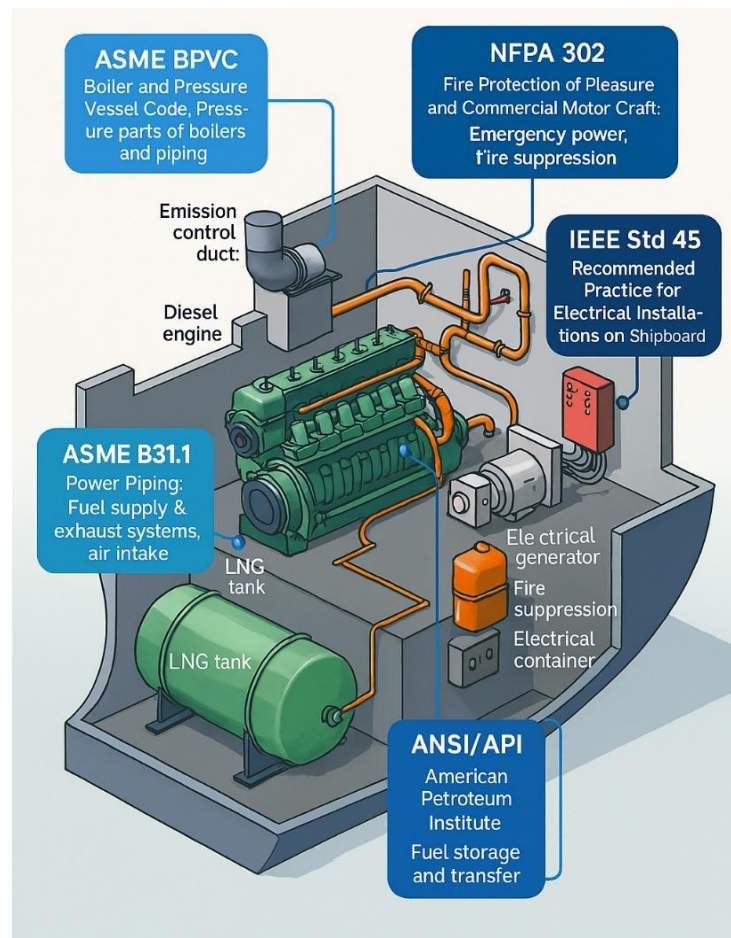


Figure 1 – ANSI-affiliated standards for the Marine Propulsion System

Equipment spares and repairs are almost universally sourced to CIS standards, and the inclusion of English-language documentation or globally compatible interface details varies widely.

Compliance is monitored via regular inspections by CIS maritime authorities, supplemented for specific international missions by bridging certifications or supplementary audits.

There is a growing trend toward digitized records (in step with international practice), but the pace and depth of adoption vary significantly across CIS shipyards and operators.

Conclusions:

ANSI and GOST/OST standards represent two well-established, yet distinct, frameworks for marine power plant design, construction, certification, and operation. ANSI standards provide expansive global recognition, modularity, innovation support, and advanced digital integration, while GOST/OST standards offer robust, climate-suited solutions and streamlined domestic operations for CIS. Certification pathways, technical compatibility, safety philosophies, and maintenance cultures differ markedly, with notable interoperability challenges in cross-standard projects.

For marine industry stakeholders, the choice of standards must be informed by operational geography, long-term vessel deployment strategy, and access to supply chains and technical support infrastructure. Effective cross-standard strategies require advanced planning, expert guidance, and a robust understanding of the certification and compliance landscape.

By carefully considering these differences and aligning project strategies accordingly, marine engineers, shipyards, and owners can ensure both technical excellence and regulatory compliance – whether operating within, or bridging, these major global standards regimes.

The increasing global focus on decarbonization, emission reduction (e.g., IMO Net-Zero Framework, FuelEU Maritime), and advanced marine electronics are accelerating the convergence and updating of maritime standards. While ANSI-aligned systems excel in supporting innovation and international trade, GOST/OST standards remain vital for domestic and regional operations in CIS. The gap between the two is narrowing in some areas, especially as CIS participates in some international conventions and aligns specific new standards to ISO protocols, yet key philosophical and procedural differences remain.

Early selection of the primary standards path is crucial for shipowners, operators, and marine engineers – preferably before design finalization. Vessels built and equipped purely to ANSI/ISO standards will enjoy the most incredible freedom in international operations. At the same time, those tailored to GOST/OST will benefit from maximum operational efficiency and compliance in CIS markets.

Hybrid approaches, while possible, require significant documentation, translation, and dual-certification resources and may increase cost and technical risk. Therefore, understanding the primary area of operation and likely future trade routes should guide standards selection at the design phase.

References:

- [1]. “ANSI (American National Standards Institute)” 10.09.2025. [Online]. Available: <https://www.ansi.org/about/introduction>
- [2]. ANSI/ARESCA 62600-20:2023. Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 20: Design and analysis of an Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) plant – General guidance. Washington, D.C.: American National Standards Institute, 2023. — 42 p.
- [3]. ASTM International. Standard Practice for Human Engineering Design for Marine Systems, Equipment, and Facilities [Текст] : ASTM F1166-07. — West Conshohocken, PA : ASTM International, 2007. — 228 p.
- [4]. U.S. Department of Labor. Shipyard Industry Standards [Текст] / Occupational Safety and Health Administration. — OSHA 2268-10R. — Washington, D.C. : U.S. Department of Labor, 2014. — 148 p.

УДК 621.12

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ РОБОТИ
ЕЛЕМЕНТІВ СЕУ ПРИ СПАЛЮВАННІ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ****Димо Б. В.,***к. т. н., професор кафедри технічної теплофізики і суднових паровиробних установок
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.**Миколаїв, Україна,**borys.dymo@nuos.edu.ua***Колбасенко О. В.,***PhD, Ch/Eng. m/v DP2 «Al Harthy Tide» Tide Water company, USA**rekamore45@ukr.net***Анастасенко С. М.,***к. т. н., доцент, завідувач кафедри теплоенергетики та технологій машинобудування
Первомайського навчально-наукового інституту**Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова. Первомайськ, Україна,**serhii.anastasenko@nuos.edu.ua*

Анотація. Метою роботи є обґрунтування можливості підвищення техніко-економічної та екологічної ефективності, а також надійності елементів СЕУ, в яких спалюються водопаливні емульсії. Для досягнення поставлених цілей проведено дослідження горіння мазуту та емульсій на його основі. Істотним результатом є те, що при водоутриманні близько 30% у складі димових газів досягається відношення $NO_2:NO$ на рівні 0,35...0,5, що підвищує абсорбційні властивості сірчистих газів і призводить до пасивації сталі в конденсаті сірчаної кислоти, що дозволяє застосувати конденсаційні поверхні і знизити температуру відхідних газів до 80...100 °С, підвищити ККД допоміжних котлів на 10...15% і досягти економії чистого палива до 8 % у дизельних та до 25 % у котельних установках.

Ключові слова: емульсія, водовміст, корозія, конденсаційні котли.

Вступ. Зростання вартості рідкого палива призвело до необхідності спалювання важких сірчистих палив, що впливає на конструктивні особливості головних, допоміжних (ДК) та утилізаційних (УК) котлів суднових енергетичних установок (СЕУ), на їх економічні, екологічні і експлуатаційні показники. В той же час посилення вимог міжнародних організацій в області

охорони навколишнього середовища до вмісту забруднюючих речовин у відпрацьованих газах двигунів СЕУ вимагає створення нових комплексних систем очистки димових газів, а також підвищення ефективності систем утилізації теплоти (зменшенні теплових втрат) при спалюванні органічних палив, вартість яких зростає.

Актуальність дослідження. Загальновизнаним напрямом підвищення ефективності використання рідкого палива з погляду енергозбереження і захисту навколишнього середовища вважається спалювання органічних палив у вигляді водопаливних емульсій (ВПЕ). Робота елементів СЕУ на ВПЕ дозволяє зменшити рівень токсичних інгредієнтів в відпрацьованих газах двигунів (зменшити вміст токсичних компонентів NO_x , SO_x , CO , бенз(а)пірену)) та підвищити рівень утилізації теплоти відпрацьованих газів. Але при цьому практично відсутні конкретні відомості про перебіг корозійних процесів на поверхнях нагріву СЕУ при використанні ВПЕ, а опубліковані нечисленні дані носять якісний характер. Це зумовило необхідність створення комплексної системи підвищення надійності й довговічності елементів СЕУ, отримання кількісних даних щодо характеристик ВПЕ, дослідження основних процесів використання ВПЕ в елементах СЕУ, починаючи з процесів її приготування.

Постановка задачі. Створення комплексної системи підвищення екологічних, техніко-економічних показників та надійності елементів СЕУ під час використання ВПЕ вимагає прийняття таких технологічних і конструктивних рішень, що будуть направлені на інтенсифікацію процесів в паливоспалюючих пристроях. Необхідний рівень кінцевих екологічних показників роботи елементів СЕУ формується вздовж всього технологічного тракту, починаючи від підготовки палива необхідної якості. Тому важливим фактором є якість і стан води, що використовується як для приготування ВПЕ, так і для проведення інтенсивної абсорбції NO_x , SO_2 , CO_2 в скруберах. Саме вивчення процесів сумішоутворення ВПЕ та подальший їх вплив на екологічні та техніко-економічні характеристики процесів спалювання ВПЕ в елементах СЕУ є основною метою цієї роботи.

Результати досліджень. Екологічна та економічна ефективність спалювання

ВПЕ представлена в багатьох публікаціях. Перехід на ВПЕ поліпшує всі основні показники сумішоутворення в камері згоряння дизельного двигуна, що при процесах згоряння веде до підвищення швидкості згоряння і скороченню сажоутворення за рахунок утворення мікрровибухів та збільшення місцевих значень коефіцієнта надлишку повітря [1–4]. Результати дослідження процесів показують, що при використанні ВПЕ має місце хімічна активація горіння палива молекулами води. При дробленні потоку ВПЕ на краплі в камері згоряння до накопичених іонів води додаються такі ж іони продуктів термічного розкладання вуглеводнів мазуту, а сам процес займання ВПЕ настає легше й раніше в порівнянні з режимом горіння безводного мазуту. Причому, через первинне нагромадження H^+ , OH^- , H_2O_2 при горінні атомарного водню з рекомбінацією відбувається виділення теплоти цієї реакції на рівні 216000...335000 кДж/кг (холодна плазма). При горінні у факелі палаючої ВПЕ спостерігаються білі спалахи, характерні

для горіння водню, що можливо тільки приспалахах низькотемпературної плазми внаслідок мікрровибухів крапель ВПЕ. Після мікрровибуху краплі ВПЕ в ударній хвилі за фронтом газ сильно іонізований, а його іонна і електронна температури не збігаються. У стрибку ущільнення нагріваються тільки важкі частки, але не електрони, а обмін енергією між іонами та електронами відбувається повільно внаслідок великого розходження їхніх мас. Таким чином, при спалюванні ВПЕ має місце одночасний вплив на процеси горіння електрохімічних реакцій і ударних хвиль, що створюють відповідне акустичне поле не тільки в камері згоряння, а і в конвективному газозоді. У зоні максимуму температур реакцій більшості сучасних камер згоряння компоненти палива завжди перебувають у частково збудженому стані. Але подальше збільшення частки збуджених часток приводить до значної зміни характеру протікань більшості реакцій. По даним [5] електричний розряд, як у силу високої ефективної температури (до 12000 К), так і через високу енергію вільних електронів, значно сильніше сприяє збудженню радикалів і молекул. У зоні основного розряду переважають реакції безпосередньої іонізації часток електронним ударом. Такі ж процеси повинні відбуватися і при мікрровибухах крапель кавітаційних ВПЕ.

В [6] розглянуто вплив ступеня початкової іонізації плазмового включення і представлені залежності приросту мольних часток відповідних речовин від ступеня іонізації включення, початкового діаметра включення і початкової температури середовища. Ріст початкового ступеня іонізації у всіх випадках передбачувано призводить до загального збільшення концентрацій активних часток (як і швидкостей їхнього виробництва – розпаду). Для інертного повітряного середовища пікові миттєві концентрації атомарного кисню монотонно зростають у міру збільшення початкової температури. Мінімум пікових мольних часток спостерігається для гідроксильних радикалів, концентрації яких незначно зростають при температурі полум'яної зони від 1200 до 1400 К (відповідає початковим ділянкам запалення і зони змішання) з наступним монотонним зниженням при 1800–2000 К, після чого спостерігається стрибкоподібне зростання виробництва ОН, явно взаємозалежне з дисоціацією молекул води, що швидко утворюються у високотемпературній зоні, а також з інтенсифікацією ударних розщеплень вуглеводневих залишків збудженими частками плазмового включення, що необхідно врахувати при розгляді впливу мікрровибухів при спалюванні ВПЕ. У ході досліджень встановлено нелінійний взаємозв'язок між початковим діаметром включення виходом активних речовин. Як при збільшенні, так і при зменшенні початкового діаметра плазмової зони в діапазоні від 1 до 6 мм спостерігається розщеплення впливу початкової іонізації на виробництво ОН і атомарного О. Очевидно, характер розсіювання збуджених часток (як дифузійно-конвективного, так і перезарядного механізму) і швидкість зниження середнього ступеня збудження пов'язаний із площею поверхні початкової зони й концентрацією характерних реагентів в основному потоці.

Проведені експериментальні дослідження [3, 4] показують, що при спалюванні в топці котла і в камері згоряння (КЗ) експериментальної установки ХФ НУК при забезпеченні постійної температури газів на виході із топки (КЗ) економія чистого палива досягає 25 % при спалюванні

ВПЕ з водомісткістю 25 %. Згідно аналізу даних [7] при спалюванні ВПЕ з водомісткістю 25 % у високообертових ДВЗ (ВОД) економія чистого палива склала 8 % при забезпеченні постійного значення потужності. Проведене зіставлення відносних значень витрат ВПЕ до витрат чистого палива при однакових значеннях водомісткості у межах від 5 до 30 % в котлі, КЗ та ВОД показали, що вони мають практично однакові значення.

Висновки. Аналіз літературних даних і одержані результати досліджень показують, що процеси згоряння палива в елементах СЕУ при використанні ВПЕ у значній мірі визначаються законами хімічної кінетики взаємодії вуглеводнів і їхніх радикалів з молекулами та продуктами дисоціації води. ВПЕ є не просто продуктами фізичного змішання вуглеводневого палива з хімічно інертною рідиною, а зовсім особливим видом палива, що як якісно, так і кількісно змінює процеси, що характеризують горіння палива в камері згоряння дизеля, бо вказаний рівень економії палива може бути досягнутий за рахунок окислення іонів і молекул водню, що містяться у активованій при жорсткій кавітації води ВПЕ.

Використання кавітаційно підготовлених ВПЕ (на основі сірчистих палив) з водомісткістю біля 30 % в елементах СЕУ забезпечує необхідну енергію мікрровибухів крапель ВПЕ і відповідну турбулентність у факелі палива, що згоряє, внаслідок чого зменшується концентрація твердих часток і знижується забруднення поверхонь нагрівання. При спалюванні такого складу ВПЕ на виході із зони горіння внаслідок автоматичного (природного) проходження фізико-хімічних процесів у складі димових газів з'являється суміш оксидів азоту з співвідношенням компонентів $\text{NO}_2:\text{NO}$ близького до еквімолярного співвідношення 0,35...0,5, при якому при температурах поверхні нижче ТТР пари H_2SO_4 має місце найбільш інтенсивна абсорбція конденсатом сірчаної кислоти оксидів азоту. Це забезпечує появу пасивної плівки на поверхні металу і внаслідок цього різке зниження НТК до рівня 0,15 мм/рік при горінні кавітаційної ВПЕ в межах температури поверхні металу 140...70°C. Ця особливість дає можливість не тільки забезпечити зниження швидкості НТК, але і інтенсифікувати абсорбцію NO_x і SO_2 (має місце зниження на виході з газового тракту NO_x в 3,6 рази, SO_2 в 2,9 рази). Крім того, в зв'язку з різким зменшенням інтенсивності НТК можливо знизити температуру газів на виході з УК до рівня 80...90°C, що суттєво зменшує втрату теплоти з відхідними газами і забезпечити більш глибоку утилізацію теплоти цих газів шляхом встановлення конденсаційних поверхонь нагрівання, а значить підвищення ККД ДК до 95 % і глибини утилізації вихлопних газів в УК після ГД до 70 % (замість 45 %).

Література:

[1] Allaa M., Soulayman S., Abdelkarim T., Walid Z. Water/Heavy Fuel Oil Emulsion Production, Characterization and Combustion. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 2021, vol. 10, no3, pp. 597-605.

DOI: <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.34873>

[2] Omi R.T., Yahya W.J., Abd Kadir H., Ezzat Chan A.F., Ithnin A.M., Abdullah N.R., Rahman M.M., Tahir U. Performance and Emissions of Diesel Engine with Circulation Non-Surfactant Emulsion Fuel System. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2021, vol. 82, no. 2, pp. 96-105. DOI: <https://doi.org/10.37934/arfmts.82.2.96105>

[3] Kolbasenko O.V., Dymo B.V., Anastasenko S.M., Shostak O.V. (2025). Features of Combustion of Water-fuel Emulsions with Different Methods of Introducing Water into the Combustion Zone. *Problems of the Regional Energetics*, no. 2 (66), pp. 178-189. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.15>

[4] Technology for Improving Technical, Economic and Ecological Efficiency of Boiler Plants Using Physico-Chemical Correction of the Water-Fuel Emulsions Composition. 2021./ Filipshchuk A.N., Kolbasenko O.V., Shevtsov A.P., and Dymo B.V. // *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE*, №3 (51), pp. 62-77.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.06>

[5] Долматов Д.А., Кукуруза А.В., Хаджіванд М. (2012). Хімічна кінетика реакцій збуджених частинок за слабкої іонізації середовища/ *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, №8 (95). - С. 73–78.

[6] Долматов Д.А. (2013). Генерация гидроксильных та атомарного кислорода поблизу малих плазмовых включений/ *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, №8(105).- С. 167–171

[7] Parsadanov, I., Marchenko, A., Tkachuk, M., Kravchenko, S. et al., Complex Assessment of Fuel Efficiency and Diesel Exhaust Toxicity, *SAE Technical Paper* 2020-01-2182, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-2182>.

Dymo B.V., Kolbasenko O.V., Anastasenko S.M.

Increasing the Efficiency and Reliability of the Elements of Ship Power Plants when Combusting Water-Fuel Emulsions

Admiral Makarov National University of Shipbuilding. Mykolaiv, Ukraine. **Abstract.** The purpose of the work is to substantiate the possibility of increasing the technical, economic and environmental efficiency, as well as the reliability of the elements of the Ship Power Plants, in which water-fuel emulsions are burned. To achieve the set goals, a study of the combustion of fuel oil and emulsions based on it was conducted. The significant result is that with a water content of about 30% in the composition of flue gases, the $\text{NO}_2:\text{NO}$ ratio is achieved at the level of 0.35...0,5, which increases the absorption properties of sulfur dioxide gases and leads to passivation of steel in sulfuric acid condensate, which allows the use of condensing surfaces and reducing the temperature of exhaust gases to 80...100 °C, increasing the efficiency of auxiliary boilers by 10...15 % and achieving savings of clean fuel up to 8 % in diesel and up to 25 % in boiler plants.

Keywords: emulsion, water content, corrosion, condensing boilers.

УДК 629.4.048

ВПЛИВ ДВОСТУПЕНЕВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДУ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ГАЗОВИМИ ДВИГУНАМИ АВТОНОМНОЇ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*Грич А. В., к. т. н., доцент кафедри кондиціювання та рефрижерації
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв
artem.grich@gmail.com*

Анотація. Досліджено вплив двоступеневого охолодження повітря машинного відділення автономної теплоелектростанції на базі газових двигунів (ГД) на зниження викидів шкідливих речовин. Запропоновано спосіб двоступеневого охолодження припливного повітря ГД шляхом трансформації скидної теплоти ГД у каскадній абсорбційно-парокомпресорній холодильній машині.

Ключові слова: двоступеневе охолодження, газовий двигун, повітроохолоджувач, автономна теплоелектростанція.

Більш глибоке охолодження повітря за рахунок використання двоступеневого повітроохолоджувача (ПО) дозволяє скоротити питому витрату палива ГД до $\Delta b_{e, \text{ПО}} = 0,7 \dots 1,2$ г/(кВт·год). Враховуючи загальну потужність двигуна та скорочення питомої витрати палива, було розраховано добове скорочення витрати палива на ГД. Добова економія палива за допомогою двоступеневої системи кондиціювання складає $\Sigma \Delta V_e = 30$ м³ в порівнянні з базовим варіантом $\Sigma \Delta V_e = 16$ м³. Крім того, використання прямої подачі охолодженого повітря на ТК ГД дозволяє охолоджувати лише циклове повітря ГД, а надлишок теплоти з МВ відводити за допомогою системи вентиляції, зменшуючи, при цьому, витрату холоду. Зменшення на 90 % об'єму охолоджуваного повітря дозволяє скоротити витрати холоду до $\Delta Q_{0, \text{ПО}} = 276$ кВт в найбільш жарку пору доби, що є принципово важливим для безперебійного забезпечення холодом технологічного процесу підприємства.

Двоступенева система кондиціювання повітря на вході в ГД має не тільки економічну доцільність у зменшенні витрати палива, а і екологічну. Газові двигуни під час роботи виділяють разом з видхідними газами шкідливі викиди такі як – оксид азоту NO_x та монооксид вуглецю CO. За даними фірми виробника GE Jenbacher JMS 420 GS-N.LC при повному навантаженні у відхідних газах міститься близько 500 мг/м³ NO_x та близько 650 мг/м³ CO [1–4]. Отже, зменшуючи витрату пального можна зменшити частку шкідливих викидів від ГД в атмосферу.

Екологічний розрахунок скорочення шкідливих викидів NO_x і CO проводився з використанням даних фірми-виробника ГД GE Jenbacher про викиди. Розрахунок базується на пропорційності скорочення шкідливих викидів кількості зекономленого палива ГД. На рис. 1 представлені результати розрахунків очікуваного екологічного ефекту від розроблених рішень.

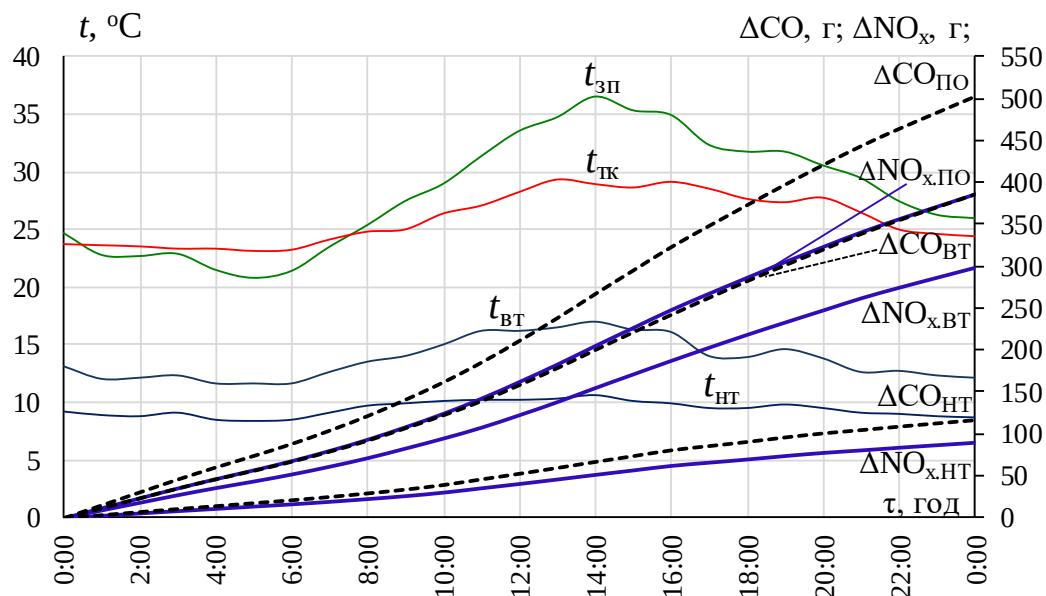


Рис. 1 – Зміна температури зовнішнього повітря $t_{3П}$, повітря на вході ТК ГД $t_{ТК}$, на виході з ПО високотемпературного ступеня $t_{ВТ}$, на виході з ПО низькотемпературного ступеня $t_{НТ}$, $\Delta NO_{x,ВТ}$ – скорочення викидів NO_x за рахунок охолодження повітря в високотемпературному ступені ПО; $\Delta NO_{x,НТ}$ – скорочення викидів NO_x за рахунок охолодження повітря в низькотемпературному ступені ПО; $\Delta NO_{x,ПО}$ – скорочення викидів NO_x за рахунок повного охолодження в ПО; $\Delta CO_{ВТ}$ – скорочення викидів CO за рахунок охолодження повітря в низькотемпературному ступені ПО; $\Delta CO_{НТ}$ – скорочення викидів CO за рахунок охолодження повітря в низькотемпературному ступені ПО; $\Delta CO_{ПО}$ – скорочення викидів CO за рахунок повного охолодження в ПО

Як видно з рис. 1, добове скорочення викиду $\Delta NO_{x,ПО} = 400$ г, а $\Delta CO_{ПО} = 500$ г. Враховуючи додаткове скорочення витрати палива за рахунок скорочення витрати електроенергії на електровентилятор повне скорочення викидів $\Delta NO_x = \Delta NO_{x,ПО} + \Delta NO_{x,ЕВ}$ та $\Delta CO = \Delta CO_{ПО} + \Delta CO_{ЕВ}$ представлено на рис. 2.

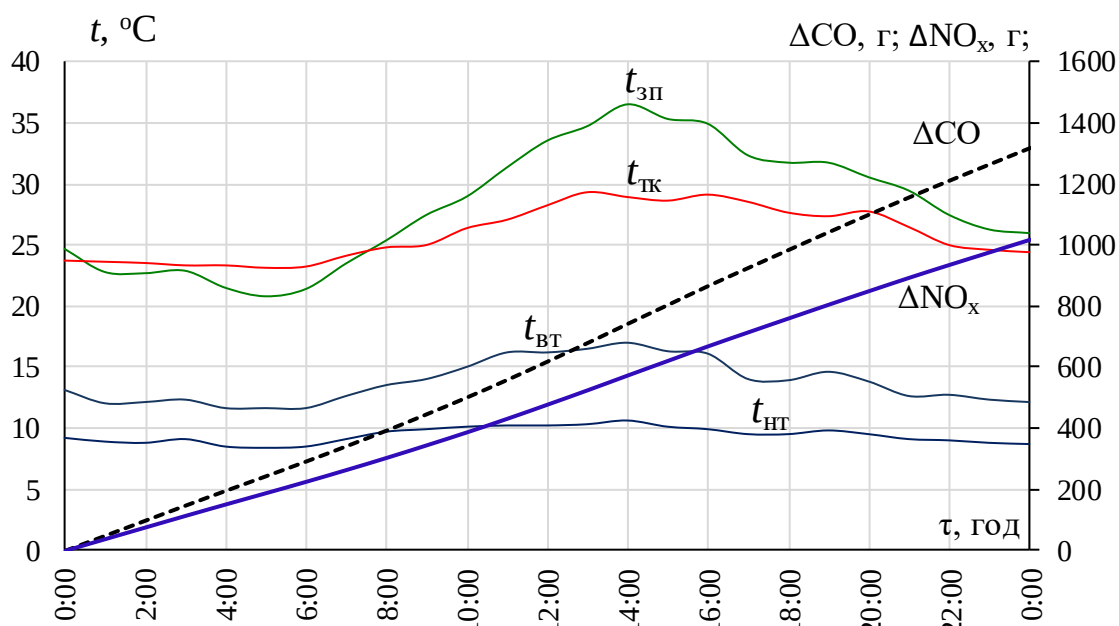


Рис. 2 – Зміна температури зовнішнього повітря $t_{3П}$, повітря на вході ТК ГД $t_{ТК}$, на виході з ПО високотемпературного ступеня $t_{ВТ}$, на виході з ПО низькотемпературного ступеня $t_{НТ}$, ΔNO_x – скорочення викидів

NO_x за рахунок повного охолодження в ПО та скорочення витрат електроенергії ЕВ; ΔCO_{ПО} – скорочення викидів СО за рахунок повного охолодження в ПО та скорочення витрат електроенергії ЕВ

Система двоступеневого охолодження з зональною подачею повітря на вхід ТК ГД дозволяє скоротити шкідливі до ΔNO_{x,ПО}= 1000 г, а ΔCO_{ПО}=1300 г за добу, що свідчить не лише про економічну та енергетичну, а і про екологічну доцільність розроблених рішень та схем.

Висновки

Розроблено спосіб двоступеневого охолодження припливного повітря МВ ГД трансформацією скидний теплоти ГД в каскадній абсорбційно-парокомпресорній холодильній машині з холодопостачанням високотемпературного ступеня ПО_{ВТ} від АБХМ і низькотемпературного ступеня ПО_{НТ} від КАПКХМ, який забезпечує скорочення витрат палива на 10 ... 15% та пропорційно скорочує шкідливі викиди СО та NO_x в атмосферу.

Література:

1. Elsenbruch, T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications [Text] / T. Elsenbruch. – București, October 28, 2010. – 73 p.
2. Jenbacher модельный ряд 4 [Электронный ресурс] GE Power Generation – Режим доступа: https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/Reciprocating%20Engines/Jenbacher/Type%204/jenbacher-type-4-fs-ru-2016.pdf
3. Обладнання GE JENBACHER, комплектація установок [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cogeneration.com.ua/ru/equipment-ge-jenbacher/options/container/>
4. Енергетичний, екологічний та економічний аспекти ефективності теплонасосних станцій на природних та промислових джерелах тепла [Електронний ресурс] / О. П. Остапенко, Е. В. Бакум, А. В. Ющишина // Наукові праці ВНТУ. – 2013. – № 3. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/viewFile/3040/4627>.
5. Радченко А. М., Грич А. В. Охолодження приточного повітря машинного відділення газових двигунів тригенераційної установки [Текст] / А.М. Радченко, А.В. Грич // Холодильна техніка та технологія. - 2014. - № 6. - С. 20-25.
6. Ткаченко С.Й. Показники ефективності роботи енергетичних установок для сумісного виробництва теплової та електричної енергії/ Ткаченко С.Й., М.М.Чепурний, Н.В. Пішеніна. – Вінниця: Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 1. Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/ejournals/NTTU/2010-1failes/uk/.htm>. – С.54-57

THE EFFECT OF TWO-STAGE AIR COOLING ON REDUCING THE EMISSION OF HARMFUL SUBSTANCES BY GAS ENGINES OF AN AUTONOMOUS THERMOELECTRIC POWER PLANT

Hrych Artem Viktorovych PhD, Associate Professor, Department of Air Conditioning and Refrigeration;
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv

Abstract

The article investigates the effect of two-stage cooling of the air in the engine room of an autonomous thermal power plant based on gas engines (GE) on reducing harmful emissions. A method of two-stage cooling of the intake air of a gas engine by transforming the waste heat of the gas engine in a cascade absorption-vapor compressor refrigeration machine is proposed.

Keywords: two-stage cooling, gas engine, air cooler, independent thermal power plant.

УДК 621.4:623.82

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОРАБЛІВ ПРОТИМІННОЇ ОБОРОНИ РАЦІОНАЛІЗАЦІЄЮ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ

А. Ю. Волошин, к. т. н., начальник механічного відділу,

ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування», м. Миколаїв

andrii.voloshin@srdsc.com¹

А. В. Борисов, здобувач освіти, гр. 6211м, НУК ім. адм. Макарова²

Анотація. Підвищення ефективності комплексного функціонування та взаємодії значної кількості технічних засобів корабля, дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні властивості, ефективність його використання за призначенням та є актуальним науково-технічним завданням.

Ключові слова: пропульсивна установка, пост управління, комплексна автоматизована система, склад, інформація.

Ціль роботи – визначення складу, необхідного рівня автоматизації пропульсивної установки та наявного спеціалізованого обладнання для перспективного корабля протимінної оборони з урахуванням його водотоннажності, кількості екіпажу тощо.

Основна частина. Сучасний склад кораблів протимінної оборони (КПМО) Військово-морські сили Збройних сил України (ВМС ЗСУ) потребує постійного поповнення їх складу та сучасного переоснащення діючих зразків. Одним із напрямів зазначеного є забезпечення ефективності функціонування та раціоналізація управління технічними засобами корабля (ТЗК). У загальному випадку комплексна (інтегрована) система управління технічними засобами (Integrated Platform Management System – IPMS), як єдиний інтегрований цифровий обчислювально-керуючий комплекс на основі мікропроцесорної техніки, забезпечує об'єднання інформаційних ресурсів оснащення ходового командного пункту (ХКП), постів управління протимінної оборони (ПМО) і енергетики і живучості (ПЕЖ), за наявності його на КПМО, для координованого виконання основних завдань, щоденної експлуатації, тренування та навчання екіпажу.

Підвищення ефективності комплексного функціонування та взаємодії значної кількості ТЗК, дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні властивості корабля, ефективність його використання за призначенням та є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз обсягу автоматизації пропульсивної установки (ПрУ) КПМО та організація систем управління ПрУ на відомих КПМО закордонного виробництва показав, що при створенні автоматизованих систем управління (АСУ) ПМО і ПрУ КПМО їх особливості узгоджуються оскільки обладнання, яке управляється зазначеними системами, має діяти узгоджено, за передбаченим алгоритмом [1–11].

Для оцінки обсягу автоматизації пропульсивної установки (ПрУ) перспективного КПМО в складі наступних об'єктів управління: головні двигуни, передачі, рушії, рулі, підрулюючи пристрої, установки малого ходу (УМХ), заспокоювачі хитами тощо необхідно обґрунтувати структурні схеми варіантів функціонування комплексної системи управління (КСУ) ТЗК КМПО необхідного рівня автоматизації ПрУ та наявного спеціалізованого для КПМО обладнання з урахуванням його водотоннажності,

Пропонується в цілому організацію управління ПрУ на КПМО здійснювати з таких постів управління: ходовий командний пост (ХКП); пост протимінних операцій (ПМО); пост енергетики та живучості (ПЕЖ); виносні панелі управління, розташовані безпосередньо біля механізмів ПрУ та місцеві пости управління (МПУ).

Виходячи з можливостей функціонального застосування, управління ПрУ КПМО може бути організованим двома шляхами (за двома сценаріями):

- в звичайному режимі або в режимі переходу;
- в режимі виконання спеціалізованих операцій.

У режимі «переходу» управління всіма елементами ПрУ здійснюється її системою управління (СУ) через локальні системи управління (ЛСУ) відповідних механізмів із забезпеченням основних режимів: технологічні операції, підготовка двигунів до запуску, запуск, зупинка, підключення/відключення до/від головних передач, виведення на режим, зміна режиму, маневрування. Режими руху та маневрування в режимі переходу КПМО відбуваються при постійній взаємодії з корабельною системою навігації. При цьому підготовка до пуску, пуск, зміна режимів та зупинка головних двигунів та дизель-генераторів обов'язково повинно здійснюватися із виносних панелей управління, які розташовані безпосередньо біля механізмів.

У режимі «виконання спеціалізованих операцій», як правило СУ ПрУ отримує управляючі сигнали від спеціалізованої системи – АСУ ПМО.

Слід зазначити що в цьому режимі ПрУ реалізує режими: рух за заданою траєкторією, стоянка в заданій точці («електронний якір») тощо.

У цьому випадку СУ ПрУ при виконанні спеціалізованих операцій управляє своїми механізмами через відповідні ЛСУ, шляхом обробки управляючих команд АСУ ПМО, яка при цьому здійснює управління спеціалізованими та бойовими засобами при взаємодії з системою навігації.

Варто відзначити, що при наявності в складі ПрУ кінематично не зв'язаної з нею установкою малого ходу (УМХ), управління останньою може бути організовано локальною системою управління, яка постачається разом з нею. В цьому випадку місцеве управління механізмами УМХ буде здійснюватися із місцевих панелей управління розташованих біля них, а дистанційне – з панелей дистанційного управління, розташованих у відповідних постах, які будуть інтегровані у відповідний пульт чи місток.

Аналіз світового досвіду та практики проєктування розглянутих систем управління свідчить, що такий підхід цілком відповідає сучасним тенденціям розвитку систем управління технічними засобами сучасних кораблів протимінної оборони [1–11].

ВИСНОВКИ

1. АСУ ПМО повинна посісти одне з головних місць в управлінні перспективними кораблями протимінної оборони, стати ядром для інтеграції всіх технічних засобів КМПО в єдину інформаційно-керуючу систему для ефективного вирішення задач ПМО. 2. АСУ ПМО має забезпечити функціонування корабля в інформаційному полі загальної системи управління ВМС. 3. АСУ ПМО повинна створюватись як розподілена обчислювальна система, яка виконує повний спектр функцій автоматизації задач ПМО від планування протимінних дій корабля, опрацювання отриманої інформації та її оцінки до формування на цій базі інформаційної підтримки особового складу та безпосереднього управління з власних пультів технічними засобами, зброєю та озброєнням, керування рухом, маневруванням і позиціонуванням КМПО для виконання пошуку та знешкодження мін і МПО. 4. За результатами дослідження автоматизована система управління протимінної оборони повинна створюватись як розподілена обчислювальна система та займати одне з головних місць в управлінні перспективних корабля протимінної оборони. Зазначене дозволить забезпечити функціонування корабля в інформаційному полі загальної системи управління Військово-морських сил.

Список літератури

1. Saunders, St. (Ed.). (2020). *Jane's Fighting Ships 2020-2021*. IHS Jane's.
 2. *Avenger Class Mine Countermeasures Vessels, United States of America*. (n.d.). Naval Technology. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.naval-technology.com/projects/avenger-mine-countermeasures-ship/>
 3. *GSL Mine Counter-Measure Vessels*. (n.d.). Wikipedia. Retrieved December 9, 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/GSL_Mine_Counter-Measure_Vessels
 4. *Hunt Class Minesweeper / Minehunter, United Kingdom*. (n.d.). Naval Technology. Retrieved December 9, 2025, from www.naval-technology.com/projects/huntclass/
 5. *Huon Class, Australia*. (n.d.). Naval Technology. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.naval-technology.com/projects/huon/>
 6. *Project 12700 Aleksandrit Class. Aleksandr Obukhov Fleet Minesweeper*. (n.d.). Wikipedia. Retrieved December 9, 2025, from https://en.wikipedia.org/wiki/Alexandrit-class_minesweeper
 7. *Sandown Class ships*. (n.d.). Naval Technology. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.naval-technology.com/projects/sandown/>
 8. *Segura Class minehunters*. (n.d.). Naval Technology. Retrieved December 9, 2025, from <http://www.naval-technology.com/projects/segura/>
 9. *Korcula inshore minehunter (2007)*. (n.d.). Navypedia. Retrieved December 9, 2025, from https://navypedia.org/ships/croatia/cro_ms_korchula.htm
 10. ADI Limited, Technology Group. (n.d.). *Huon Class Minehunter Technical Overview*. Australia.
 11. L3Harris. (2021). *Minehunting propulsion and control system* [Data Sheet]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2021-02/ims-maritime-datasheet-calzoni-Minehunting-Propulsion-System.pdf>
- A. Voloshyn, Cand. Sc. (Eng.), Head of Mechanical Department, Research and Design Shipbuilding Center, LLC, Mykolaiv andrii.voloshin@srdsc.com Artur

Borysov, Student of group 6211m, Admiral Makarov National University of Shipbuilding (NUS)

Abstract. Increasing the **efficiency of complex functioning and interaction of a significant number of technical means of the ship** allows for a significant improvement in the **operational properties** and the **effectiveness of its intended use**, and is a pressing scientific and technical problem.

Keywords: propulsion plant, control station, integrated automated system, composition, information.

УДК 656.61:629.5.083.7

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН
ПРИ СТВОРЕННІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ**

О. М. Шумило, професор¹, О. М. Кононова, доцент², О. А. Россомаха, аспірант³,

Одеський національний морський університет

Україна, м. Одеса

¹shumilo.alexander@gmail.com, ²olga.kononova@gmail.com, ³roleg.post@gmail.com

Анотація. Проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості. Запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції в районі мідель-шпангоуту судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна.

Ключові слова: коефіцієнт енергоефективності EEDI, пасажирські судна, розмірна модернізація, математична модель, оптимізація, екологічність.

Вступна частина. Міжнародна морська організація (International maritime organization, далі ІМО) встановлює системні вимоги до забезпечення екологічності морських суден. Круїзні пасажирські лайнери займають серед них особливе місце, оскільки для них характерно значне споживання електроенергії, пару, холодної і гарячої води, генерація яких обумовлена використанням вуглеводного палива. Доля забруднення навколишнього середовища в світі, що припадає на судноплавство складає 3 % на вуглекислий газ (CO₂), 15 % оксидів азоту (NO_x) і 13 % оксидів сірки (SO_x). Коефіцієнт енергоефективності EEDI (Energy Efficiency Design Index) є ключовим показником, що оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та транспортної роботи судна. Діюча нормативна база ІМО у сфері міжнародного судноплавства, зокрема Конвенція MARPOL 73/78 та резолюції МЕРС, спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника. Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, що підвищує обсяг транспортної роботи та зменшує відповідний рівень EEDI. Однак питання оптимізації

розмірної модернізації з одночасним урахуванням економічних та екологічних аспектів практично не розглянуто у сучасній науковій літературі.

Мета роботи – розробка моделі оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності, тобто моделі, яка забезпечує інтегральний розгляд економічних та екологічних аспектів.

Основна частина. Коефіцієнт енергоефективності EEDI покликаний стимулювати використання двигунів, установок і обладнання, що в меншій мірі забруднюють довкілля. З 01 січня 2013 р., після початкового етапу, що розпочався з 01 липня 2011 року, судно, що проєктується, повинно мати енергоефективність, визначену коефіцієнтом EEDI, що не перевищує допустимий рівень. Цей рівень повинен підвищуватись кожні п'ять років, що ставить за мету запроваджувати нововведення, винаходи, останні дослідження науково-технічного прогресу в галузі морської інженерії. EEDI являє собою визначене значення для конкретного проєкту судна, яке розраховується в грамах діоксиду вуглецю (CO_2) у відношенні місткості судна на морську милю. Рівень скорочення викидів CO_2 для першого етапу встановлено на рівні 10% і посилюється кожні п'ять років. Коефіцієнт EEDI було розроблено для найбільших і найенергоємніших сегментів світового торговельного флоту. В 2014 році МЕРС прийняв поправки до правил для визначення EEDI, щоб розширити сферу дії цього коефіцієнту на газовози, Ро-Ро, пасажирські судна.

Для пасажирських суден коефіцієнт EEDI визначається за рівнянням [1–9]:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{((\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}}) C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT f_w V_{ref}} \quad (1)$$

де n_{DG} – число дизель-генераторів; $\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i}$ – фактична сумарна експлуатаційна потужність дизель-генераторів, кВт; $\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} = 0,75 MCR_{DG}$; C_{FDG_i} , C_{FDG} – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю CO_2 , що утворюються при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю; SFC_{DG_i} – питома ефективна для дизель-генераторів, г/(кВт/год); $P_{DG_{eff_i}}$ – потужність, яка генерується з застосуванням енергії відпрацьованих газів дизель-генераторів; P_{eff_i} – потужність, яка виробляється інноваційними енергоефективними пристроями, і використовується для зменшення потужності дизель-генераторів, кВт; GT – gros тоннаж судна; f_j – поправочний коефіцієнт, що враховує специфічні конструктивні елементи судна; f_i – коефіцієнт, що враховує необхідність (технічних і правових) обмежень дедвейту і розраховується за рівняннями для суден льодового класу; f_{eff_i} – коефіцієнт, що враховує впровадження і застосування на судні

відповідних енергоефективних технологій; f_c – коефіцієнт, що враховує валовий обсяг вантажних приміщень; f_w – хвильовий коефіцієнт, що враховує зменшення швидкості руху судна при погіршенні метеорологічних умов.

Модернізація пасажирських суден забезпечує більш високий рівень комфортабельності, й, як наслідок, більш високий прибуток. Розмірна модернізація пасажирського судна передбачає не тільки підвищення комфортабельності судна, а, перш за все, підвищення розміру судна GT , та відповідної пасажиромісткості та зростання прибутку за рахунок не тільки підвищення статусу судна. Звичайно, що основною метою розмірної модернізації пасажирського судна є комерційна мета, тобто отримання підвищеного прибутку від експлуатації судна незалежно від форми цієї експлуатації. Тобто, навіть якщо судновласник надає операторові це судно у тайм-чартерну оренду, то відповідна ставка $F^{t-ch}(GT)$ залежить від розміру судна GT .

Але ж у сучасних умовах екологічні аспекти мають не менший пріоритет, ніж комерційні. З урахуванням зворотного зв'язку між коефіцієнтом енергоефективності $EEDI$ та GT , розмірна модернізація передбачає й зменшення екологічного навантаження на зовнішнє середовище за рахунок збільшення знаменника у (1), але ж за умови, що використовуватимуться сучасні технології, які забезпечують вплив на коефіцієнт f_{effi} , а також за витрати палива.

Таким чином, економічні результати розмірної модернізації так саме як й екологічні, є функціями від розміру судна GT , а якщо точніше, від збільшення розміру судна на величину ΔGT : $Z(\Delta GT)$ характеризує залежність економічних результатів розмірної модернізації від збільшення розміру судна на ΔGT , $EEDI(\Delta GT)$ – рівня енергоефективності від цієї ж величини.

Збільшення розміру судна ΔGT досягається за рахунок додаткової секції довжиною $X > 0$, яка для кожного конкретного судна з урахуванням його конструктивних особливостей обумовлює величину $\Delta GT(X)$, таким чином, й економічні показники, й коефіцієнт енергоефективності є функціями від X :

$$Z(\Delta GT) = Z(\Delta GT(x)) = Z(x) \quad (2)$$

$$EEDI(\Delta GT) = EEDI(\Delta GT(x)) = EEDI(x) \quad (3)$$

З урахуванням викладеного вище пропонується при оптимізації розмірної модернізації пасажирських суден враховувати як економічні чинники, так й коефіцієнт енергоефективності, який, як і економічні показники, залежить від розміру додаткової секції судна ΔGT . Такий інтегральний підхід дозволить врахувати багатоаспектність економіко-екологічних вимог щодо подальшої експлуатації суден після модернізації.

З урахуванням цільового використання додаткової секції, а саме, створення додаткових кают, необхідно врахувати «кратність» довжини додаткової секції довжині планованих кают $n_c > 0$, тобто:

$$\frac{x}{n_c} \in Z^+. \quad (4)$$

Така умова забезпечую комерційну доцільність кожного сантиметру додаткової секції. Варто відзначити, що $X = 0$ виключено із розгляду, що відповідає умові вже прийнятого рішення про збільшення розміру судна.

З іншого боку збільшення розміру судна має певні обмеження з точки зору конвенції MARPOL 73/78 [1-9], тому введемо у розгляд l_s – допустиму довжину додаткової секції, що визначається з урахуванням вимог вказаної конвенції. Таким чином:

$$x \leq l_s. \quad (5)$$

Збільшення судна за рахунок додаткової секції пов'язано з витратами $C(x)$ на проєктування, на проведення модернізації $g_1(x)$, встановлення додаткового обладнання $g_2(x)$, забезпечення умов міцності корпусу $g_3(x)$. Усі ці витрати, звичайно, обмежені можливостями фінансування розмірної модернізації R_m :

$$C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x) \leq R_m. \quad (6)$$

В деяких випадках доцільно розглядати окремі обмеження по кожній позиції витрат, пов'язаних безпосередньо з реалізацією заходів з модернізації:

$$g_1(x) \leq R_1, \quad (7)$$

$$g_2(x) \leq R_2. \quad (8)$$

$$g_3(x) \leq R_3. \quad (9)$$

Проведення модернізації шляхом збільшення розміру судна за рахунок додаткової секції має своєю метою отримання судновласником додаткового прибутку протягом певного періоду часу. Як правило цей термін встановлюється у кожній ситуації окремо з урахуванням специфіки судна, його стану та інших факторів. Приймаємо у подальшому цей термін як T . Щорічний додатковий прибуток $\Delta P^y(x)$ пов'язаний з використанням додаткових кают і в загальному вигляді може бути представлений як:

$$\Delta P^y(x) = (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}, \quad (10)$$

де P_c – середній річний прибуток від однієї каюти певного класу (що передбачається модернізацією) пов'язаний з розміщенням пасажирів, P_{ae} – середній річний прибуток від кількості пасажирів, передбачених каютами, що розглядаються, пов'язаний з витратами на відпочинок протягом рейсу пасажирів на судні (ресторан, розваги, магазини, тощо); N_d – кількість палуб, на яких планується розташування кают у додатковій секції;

$N_d \cdot \frac{x}{n_c}$ – характеризує кількість кают у додатковій секції.

Таким чином, протягом прийнятого терміну розгляду T додатковий прибуток від збільшення розміру судна складає:

$$\Delta P(x) = T \cdot \Delta P^y(x) = T \cdot (P_c + P_{ae}) \cdot N_d \cdot \frac{x}{n_c}. \quad (11)$$

Збільшення розміру судна призводить до додаткових щорічних експлуатаційних витрат $\Delta C_{op}^y(x)$, наприклад, перш за все, за рахунок збільшення портових зборів та плат, які встановлюються саме за розміром судна (як правило, за NT та/або GT). Таким чином, за певний період часу додаткові експлуатаційні витрати складають:

$$\Delta C_{op}(\Delta GT(x)) = \Delta C_{op}(x) = T \cdot \Delta C_{op}^y(x). \quad (12)$$

Отже, прикінцевий економічний результат модернізації по збільшенню розміру пасажирського судна без врахування дисконтування може бути поданий у вигляді:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x). \quad (13)$$

Тобто (19) формує баланс усіх потоків грошових коштів, які пов'язані саме з модернізацією. Саме цей вираз пропонується використовувати в якості критерію оптимізації:

$$Z(x) = \Delta P(x) - \Delta C_{op}(x) - C(x) - g_1(x) - g_2(x) - g_3(x) \rightarrow \max. \quad (14)$$

Параметр управління – змінна моделі – довжина додаткової секції X .

Слід відзначити, що максимальне значення (20) не обов'язково забезпечить необхідну ефективність судновласнику.

Тому слід врахувати дві умови: перша – це умова отримання судновласником щорічного додаткового прибутку на певному рівні, друга – це доцільність інвестиційних ресурсів, спрямованих на дану модернізацію. Зазначимо, що витрати (6) за своєю сутністю відносяться до інвестиційних витрат, тому економічна доцільність збільшення розміру судна має базуватися на їх врахуванні у вказаному сенсі.

Отже, щорічний прибуток від використання додаткових кают має забезпечувати заданий рівень $\Delta P^{\min}$:

$$\Delta P^y(x) - \Delta C_{op}^y(x) \geq \Delta P^{\min}. \quad (15)$$

Ефективність інвестицій може бути враховано за допомогою, наприклад, показника рентабельності інвестицій ROI:

$$\frac{\Delta P(x) - \Delta C_{op}(x)}{C(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \geq ROI^{\min}, \quad (16)$$

де $ROI^{\min}$ – мінімально припустимий рівень рентабельності (задається замовником модернізації). Так як $X > 0$, то знаменник у (20) теж більш 0.

Отже, (10)-(12), (14)-(16), формують основну структуру моделі для оптимізації розмірної оптимізації пасажирського судна. З урахуванням пропонованого підходу – інтегрального

розгляду економічних на екологічних аспектах модернізації – доповним (4)-(10), (4)-(16) обмеженням на зміни у енергоефективності $\Delta EEDI$, які забезпечують виконання умов 3-ї фази (з 2025 року):

$$\Delta EEDI = [EEDI] - EEDI(x) > 0 \quad (17)$$

Відзначимо, що міжнародна морська організація регламентує норми енергоефективності не тільки для нових суден, але й до суден, що зазнали таких видів модернізації як переобладнання (конверсія) і модернізація СЕУ. Резолюціями комітету з безпеки на морі МЕРС 203.(62) і МЕРС 251.(66) було внесено відповідні поправки до розділів I і II конвенції MARPOL 73/78, в яких для суден, що пройшли модернізацію, визначаються додаткові вимоги щодо перерахунку коефіцієнту $EEDI$ і порівнянні його з допустимим значенням $[EEDI]$. З урахуванням викладеного вище:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) \end{aligned} \quad (18)$$

де k^{3ph} - знижуючий коефіцієнт для 3-ої фази. Отже, для пасажирських суден від 85,000 GT $k^{3ph} = 0,7$, тобто базовий припустимий рівень енергоефективності зменшується на 30 % ([14]).

Таким чином, (23) набуває наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta EEDI(GT(x)) &= \Delta EEDI(x) = [EEDI] - EEDI(x) = \\ &= k^{3ph} \cdot 170,84 \cdot (GT * + \Delta GT(x))^{-0,214} - EEDI(x) > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

де

$$\begin{aligned} EEDI(x) &= \frac{(\prod_{j=1}^M f_i)(\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{((\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}}) C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} - \\ &- \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l GT(x) f_w V_{ref}} \end{aligned} \quad (20)$$

Дана модель дозволяє визначати оптимальний розмір додаткової секції пасажирського судна у процесі модернізації з урахуванням інтегрального підходу до розгляду економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна. Модель відноситься до класу нелінійних моделей – критерій оптимізації та більшість обмежень не є лінійними функціями.

Сутність критерію оптимізації – економічний результат модернізації для заданого періоду експлуатації судна після модернізації, обмеження враховують необхідність дотримання нормативних вимог до розміру додаткової секції та енергоефективності судна, а також можливі витрати на модернізацію.

Для експериментальної перевірки моделі були прийняті функціональні залежності наближені до реальних даних (табл. 1).

Слід зазначити, що умова (4) передбачає кратність довжини додаткової секції довжині каюти (для прикладу прийнято 3,5 м). Але ж на практиці під час досліджень доцільним є розглядання такого обмеження як перевірконої умови після оптимізації. Наприклад, при оптимальній за усіма економічними, технологічними та екологічними умовами довжині додаткової секції, але не кратної заданій величині, якщо відхилення складає припустиму довжину, то доцільним є корегування умов з довжиною кают (якщо, наприклад, мова йде про 10-25 см).

Таблиця 1 – Прийняті функціональні залежності та вихідні дані

Позначення	Прийняті значення чи залежності	Одиниці виміру
ΔP^{min}	1000	тис. дол
ROI^{min}	1,1	—
$\Delta C_{op}^y(x)$	$500 \cdot x^{0,714}$	тис. дол.
T	10	роки
n_c	3,5	м
l_c	48	м
$C(x) + g_1(x) + g_1(x) + g_1(x)$	$1031 \cdot x^{0,928}$	тис. дол
R_m	10000	тис. дол
$EEDI(x)$	$86,7 \cdot x^{-0,868}$	
$\Delta P^y(x)$	$740 \cdot x^{0,824}$	тис. дол

У процесі експериментальних досліджень моделі змінювався рівень обмежень по фінансуванню розмірної модернізації R_m у межах 20000 тис. долл – 50000 тис. дол. Оптимальний розмір додаткової секції та основні характеристики результатів модернізації наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Варіанти оптимального рішення та відповідних показників розмірної модернізації для різних вихідних умов

№	R_m	x	$Z(x)$	$\Delta EEDI$	ROI
1	50000	48	62942	7,58	2,68
2	30000	38	50709	7,05	2,69
3	20000	24	34010	5,57	2,7

Як бачимо, більш доцільним при розмірної модернізації є максимальна припустима її величина, тобто та, яка відповідає умовам діючих нормативних документів (варіант 2), саме цей

варіант забезпечую максимальні значення як економічних показників, так й відстань між досягнутим за результатами розмірної модернізації EEDI та його допустимим значенням [EEDI].

Слід зазначити, що у даному конкретному прикладі «економічна ефективність» та «енергоефективність» оптимального рішення гармонічно доповнюють одна одну та не суперечать. Тобто забезпечення економічної ефективності відбувається разом із забезпеченням енергоефективності. Але ж умовою для цього є необхідний рівень фінансування модернізації, отже за умов недостатнього рівня ресурсів економічні показники більш оптимістичні, ніж коефіцієнт енергоефективності.

Тем не менш необхідно підкреслити, що у експериментальних розрахунках не враховані можливі зміни у EEDI за рахунок, наприклад, змін у технологічному обладнанні судна на якісному рівні. Тобто у розрахунках враховано тільки вплив зміни розміру судна GT та, як наслідок, обсяг його транспортної роботи.

Подальші дослідження питання розмірної модернізації у контексті її впливу на екологічному рівні, пов'язано саме с даними питаннями, що потребує значної кількості статистичних даних щодо шкоди довкіллю різними типами суднового обладнання.

Висновки. Екологічність будь-якого виробництва – сучасна вимога, яка, у тому числі, стосується морського судноплавства. Коефіцієнт енергоефективності EEDI є показником, який оцінює співвідношення шкоди навколишньому середовищу та роботи, яку виконує судно. Діюча нормативна база у сфері міжнародного судноплавства спрямована на забезпечення поступового зниження даного показника, що у комплексі забезпечить технологічно можливу мінімізацію екологічного впливу морського судноплавства.

Один з варіантів забезпечення допустимого рівня EEDI є модернізація, у тому числі, розмірна, за результатами якої збільшується GT судна, а це, в свою чергу, підвищує обсяг транспортної роботи судна та зменшує відповідний рівень EEDI.

У роботі проведено аналіз енергоефективності суден провідних світових компаній, який можна застосовувати для визначення їх модернізаційної привабливості; запропоновано модель оптимізації розмірної модернізації пасажирського судна з визначенням довжини додаткової секції судна при інтегральному розгляді економічних та екологічних аспектів подальшої експлуатації даного судна; виконано експериментальна перевірка моделі, яка обґрунтувала її достовірність та придатність для практичного використання у процесах прийняття рішень щодо розмірної модернізації пасажирських суден.

Література

- [1] Резолюція комітету з захисту морського середовища Міжнародної морської організації 231(65). 2013 Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI) (. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231\(65\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.231(65).pdf)
- [2] Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>

- [3] IMO (2010) “Module 2 - Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines”, IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation.
- [4] IMO (2014) “2014 Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships”, MEPC 66/21/Add.1 p: 1.
- [5] IMO (2010) “Preventions of Air Pollution from Ships”, Marine Environment Protection Committee, 59th Session, Agenda item 4.
- [6] Energy Efficiency Design Index (EEDI) <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>
- [7] MARPOL Annex VI, MEPC.1 / Circ.684. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (EEOI), 17 August 2009.
- [8] MEPC.1/Circ.815: 2013. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI for ships in adverse conditions.
- [9] Tokuslu, A. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEgeo)*, 7(2): 114-119. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>
- [10] Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022, 116, 223-235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
- [11] Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koryakin, K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 113, pp. 145–153 <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>
- [12] Wolf, R., Dickman, J., & Boas, R. (2005). Ship Design Using Heuristic Optimization Methods. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-1980>
- [13] Шумило О.М. Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації // Розвиток транспорту: Науковий журнал. - № 1 (12), 2022. - С. 89-104.
- [14] Шумило О.М. Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності // Розвиток транспорту: Науковий журнал. - № 4 (15), 2022. - С. 58-77.

Shumylo O. M., Kononova O. M., Rossomacha O. A.

Ensuring energy efficiency of passenger ships when creating a mathematical model of dimensional modernization.

Abstract. An analysis of the energy efficiency of ships of leading world companies has been conducted, which can be used to determine their modernization attractiveness. A model for optimizing the dimensional modernization of a passenger ship is proposed with the determination of the length of the additional section in the area of the ship's midship frame with an integral consideration of the economic and environmental aspects of the further operation of this ship.

Keywords: energy efficiency coefficient EEDI, passenger ships, dimensional modernization, mathematical model, optimization, environmental friendliness.

УДК 621.436

АНАЛІЗ МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ЗА РАХУНОК МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Троцюк С. В., магістрант¹, Фільтанович М. С., магістрант², Борисенко В. О.,
магістрант³, Федюк Д. А., магістрант⁴, Шаля Д. О., магістрант⁵

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

Анотація. Представлено аналіз можливих шляхів підвищення екологічних та економічних показників суднових двигунів за рахунок покращення процесу паливоподачі.

Ключові слова: судновий дизельний двигун; робочий цикл; економічні показники; екологічні показники; паливна система.

Вступна частина. Покращення експлуатаційних характеристик та екологічних показників суднових дизельних двигунів включає у себе досить значне коло різнопланових питань. Так, значний вплив на економічні та екологічні показники двигуна має саме процеси паливоподачі, сумішоутворення та згоряння. Правильно організований процес паливоподачі може забезпечити зниження токсичності відпрацьованих газів, поліпшити паливну економічність та забезпечити досягнення максимальної потужності. Однак варто відзначити, що досягти одночасного покращення усіх цих показників є досить важким завданням і тому при проєктуванні двигунів намагаються досягти певного компромісного рішення [1, 2].

Мета роботи – аналіз можливих шляхів підвищення екологічних та економічних показників суднових двигунів.

Основна частина. Основними критеріями досконалості паливоподачі у суднових дизелях є показники економічності, потужності, екологічності, та шумності їх роботи. Також сучасна паливна система суднового дизельного двигуна має забезпечити високу надійність пуску в найбільш екстремальних умовах експлуатації дизеля, суворого дотримання обмежень за максимальним тиском у циліндрі, жорсткістю процесу згоряння, тепловим навантаженням на деталі, температурою відпрацьованих газів перед турбіною. Тому сучасна паливна апаратура суднового дизельного двигуна має відповідати наступним базовим вимогам [3, 4]:

– досить гнучке регулювання циклової подачі палива відповідно до необхідного режиму навантаження дизеля;

– забезпечувати мінімально можливу нерівномірність подачі палива по робочих циліндрах або, навпаки, оптимальну нерівномірність подачі для кожного робочого циліндра відповідно до його конструктивних особливостей, а також поточного технічного стану зношування;

- забезпечувати оптимальне регулювання кута випередження паливоподачі відповідно до режиму навантаження дизеля;
- забезпечувати автоматизацію пуску дизеля, потрібне збагачення при здійсненні пуску, відсікання подачі палива на примусовому холостому ходу, а також оптимальне регулювання на перехідних режимах двигуна;
- забезпечувати відключення робочих циліндрів та циклів на часткових режимах навантаження дизеля.

Одним з параметрів роботи усієї паливної системи дизеля, який має значний впливає на більшість перерахованих вище параметрів, є тиск упорскування палива. Так, наприклад, поєднання паливного насосу високого тиску (ПНВТ) та паливної форсунки в єдиний механізм – насос-форсунку надає змогу забезпечити значно високі тиски упорскування, ніж звичайні класичні роздільні системи з окремими ПНВТ та форсункою. Так, використання на суднових дизелях насос-форсунок має ряд значних переваг:

- досить високий тиск упорскування (до 200 МПа) за рахунок максимальної мінімізації об'єму палива, що стискається;
- фактична відсутність підвприску палива після закінчення паливоподачі;
- значне зменшення кількості складових паливної системи дизеля;
- досить різке відсічення паливоподачі;
- менша схильність до закоксованості розпилювача;
- більший ресурс розпилювача форсунки;
- значне менші витрати потужності;
- значне зниження запізнювання уприскування щодо нагнітального ходу плунжера, що забезпечує зменшення розкиду кутів випередження упорскування палива за частотами й знижує потрібний діапазон регулювання.

Однак варто відзначити і ряд недоліків застосування насос-форсунок головними з яких є:

- значне ускладнення конструкції кришки робочого циліндра дизельного двигуна;
- деяке збільшений діаметру форсункової частини;
- суттєве зниження тиску уприскування палива на часткових режимах навантаження дизеля;
- більш складні та менш точні умови регулювання рівномірності подачі по робочих циліндрах дизеля.

Забезпечення регулювання рівномірності паливоподачі по робочих циліндрах у багатоциліндрових суднових дизельних двигунах може бути забезпечено за рахунок застосування єдиного пристрою для регулювання подачі палива, зробленого у вигляді спеціального роторного розподільника, що встановлюється між джерелом паливоподачі під тиском, каналами підведення палива до насос-форсунки й зливним каналом. Однак, варто відзначити, що більш перспективним є застосування паливних насос-форсунок, що обладнанні

клапанами регулювання з електромагнітним приводом. Певний момент подачі пускового сигналу на такий електромагнітний клапан форсунки (момент його закриття) означатиме початок подачі палива до камери згоряння дизеля. Тривалість подачі пускового сигналу на клапан визначатиме кількість циклової подачі палива до циліндра. Момент, а також тривалість пускового сигналу задається електронним блоком керування відповідно до режиму навантаження суднового дизельного двигуна та умов навколишнього середовища. Також таким блоком фіксуються і інші параметри:

- частота обертання розподільчого та колінчастого валів;
- тиск повітря на впуску;
- температури повітря, охолоджуючої рідини та палива на вході.

Усі ці та багато інших важливих даних реєструються датчиками та обробляються в блоку керування паливоподачею для подальшого реагування на процес паливоподачі.

Висновки. 1. Виконано аналіз можливих шляхів підвищення екологічних та економічних показників суднових двигунів за рахунок модернізації паливної системи. 2. Виділено основні недоліки та переваги застосування насос-форсунок на суднових дизелях.

Список літератури

- [1] Суднові двигуни внутрішнього згоряння: Підручник / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2015. – 332 с.
- [2] Наливайко В.С. Конструктивні вузли та системи суднових двигунів внутрішнього згоряння : навчальний посібник / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський. – Миколаїв : Нук, 2013. – 100 с.
- [3] Heywood John B. Internal Combustion Engine Fundamentals / John B. Heywood. - New York.: McGraw Hill New York, 1988. – 930 –. – ISBN 0-07-100499-8
- [4] Mollenhauer, K. Handbook of diesel engines / K. Mollenhauer, H. Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. –634 p.

Analysis of possible ways to increase the environmental and economic performance of marine engines by modernizing the fuel system

Trotskyuk S., Filtanovych M., Borisenko V., Fedyuk D., Shalya D.

An analysis of possible ways to increase the environmental and economic performance of marine engines by improving the fuel supply process is presented.

Keywords: marine diesel engine; operating cycle; economic performance; environmental performance; fuel system.

УДК 621.431

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОХІМІЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА

*Митрофанов О. С., д-р техн. наук, проф.¹, Снісар О. Е., магістрант²,
Завгородній Д. Е., магістрант³, Білогруд М. М., магістрант⁴, Білячат О. М.,
магістрант⁵*

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹mitrofanov.al.ser@gmail.com

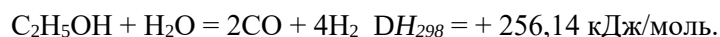
Анотація. Представлено результати теоретичного дослідження застосування термохімічної утилізації тепла відпрацьованих газів для автомобільного двигуна з іскровим запаленням.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; відпрацьовані гази; термохімічна утилізація тепла; робочий цикл; ефективні показники; термохімічний реактор конверсії.

Вступна частина. Для двигунів з примусовим запалюванням транспортних енергетичних установок одним з перспективних методів утилізації тепла відпрацьованих газів (ВГ) є саме термохімічна утилізація [1, 2]. Такий спосіб утилізації передбачає застосування тепла ВГ двигуна для здійснення ендотермічної реакції в результаті якої відбувається хімічне перетворення рідкого вуглеводневого палива у газове. Отриманий таким чином газове паливо (яке прийнято називати синтез-газом) здебільшого у своєму складі містить водень, оксид вуглецю, метан, етилен, а також діоксиду вуглецю [1–5]. Причому об'ємні частки компонентів такого газового палива можуть бути досить різними. Так, склад і частки компонентів напряду залежать від ступеня конверсії, вихідного палива, хімічних реакцій за якими відбувається утворення синтез-газу та ін. [6, 7].

Мета роботи – підвищення ефективності роботи автомобільного двигуна шляхом застосування термохімічної утилізації теплоти ВГ.

Основна частина. Автомобільний чотирьох циліндровий двигун з іскровим запаленням 4Ч 9,55/8,6, робочим об'ємом у 2464 см³ та потужністю у 100 кВт було переведено на спиртове паливо (етанол). Тоді для реалізації термохімічної утилізації тепла ВГ найбільш підходящою, з точки зору досягнення найбільшої ефективності, є реакція парової конверсії (паровий риформінг):



Для ефективної реалізації парової конверсії в автомобільному двигуні з іскровим запаленням потрібно щоб температурно-енергетичний потенціал ВГ був достатнім для проходження реакції парової конверсії (рис. 1).

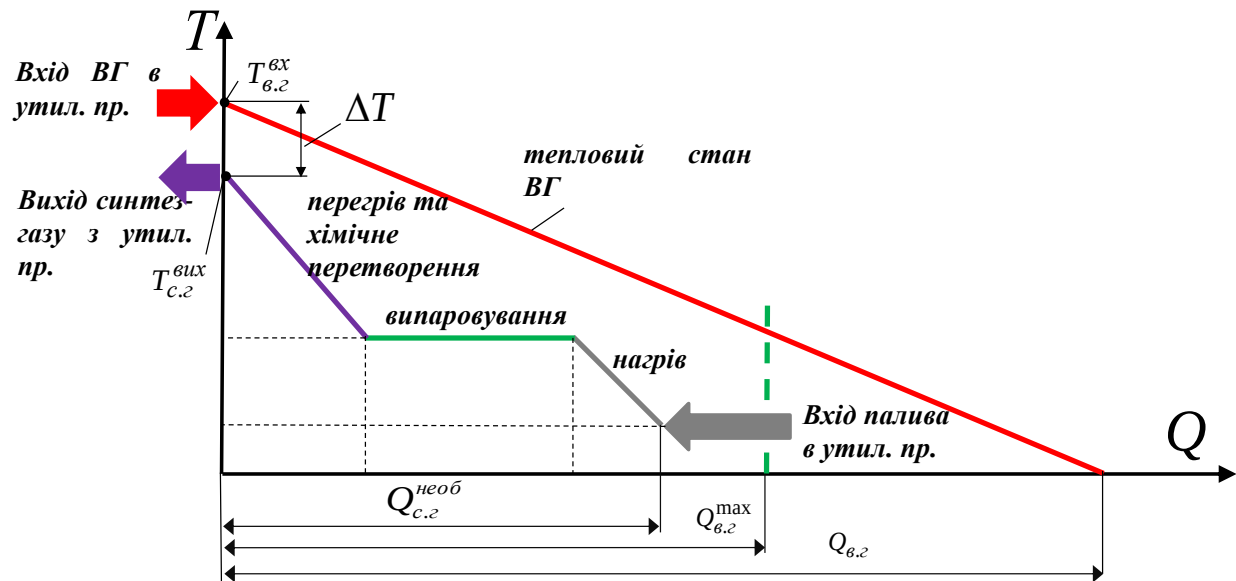


Рисунок 1 – Узгодження параметрів відпрацьованих газів автомобільного двигуна та процесу парової конверсії

Аналіз проведеної серії розрахунків робочого циклу автомобільного двигуна 4Ч 9,55/8,6 на різних режимах навантаження дозволив визначити, що енергетичний потенціал ВГ за умов застосування у термохімічному реакторі відомих каталізаторів є цілком достатнім для реалізації реакції парової конверсії.

У результаті розрахунків було відмічено деяке збільшення максимального тиску згоряння (до 5,5 МПа), яке обумовлене перш за все присутністю значної кількості водню у складі синтез-газу (рис. 2). Незначне збільшення максимального тиску згоряння не перевищує допустимих значень навантаження на деталі кривошипно-шатунного механізму автомобільного двигуна 4Ч 9,55/8,6. При цьому деяке збільшення коефіцієнту надлишку повітря забезпечує стабільне та спокійне згоряння без різких наростань тиску.

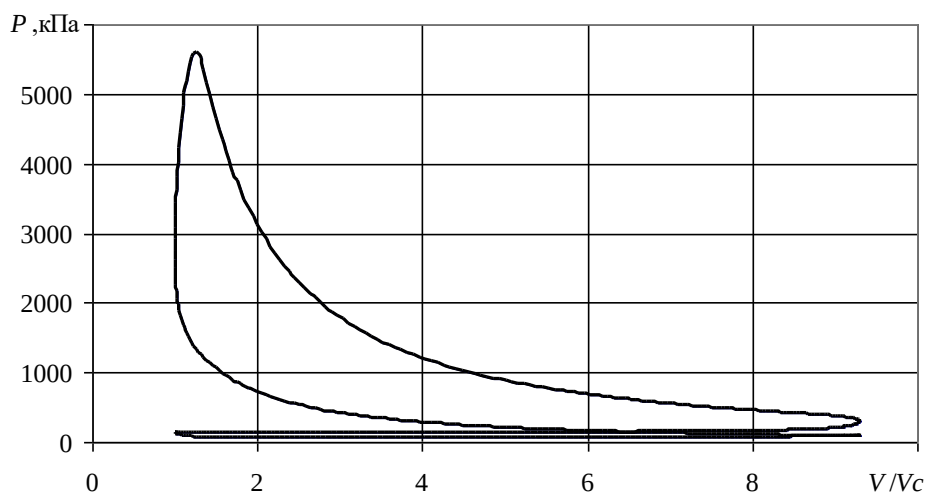


Рисунок 2 – Індикаторна діаграма у p - V координатах автомобільного двигуна 4Ч 9,55/8,6 при роботі на синтез-газі

За результатами виконаних досліджень встановлено, що питома ефективна витрата палива g_e автомобільним двигуном 4Ч 9,55/8,6 при застосуванні термохімічної утилізації для діапазону зміни ступеня конверсії 80...100 % складатиме від 1 до 22 %.

Висновки. 1. Встановлено, що при роботі автомобільного двигуна 4Ч 9,55/8,6 на синтез-газі в залежності від режиму навантаження спостерігаються зниження питомої ефективної витрати палива до 22 %. 2. Встановлено, що при роботі двигуна на синтез-газі та залежності від прийнятого значення коефіцієнту надлишку повітря тривалість процесу згоряння складатиме 34...48 град п.к.в.

Список літератури

- [1] 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.
- [2] Shudo T. Combustion Characteristics of H₂–CO–CO₂ Mixture in an IC Engine / T. Shudo, K. Tsuga, Y. Nakajima // SAE Technical Paper Series. – 2001. – 5–8 March. – P. 105–115.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Ethanol steam reforming on Ni/Al₂O₃ catalysts: Effect of Mg addition / A. J. Vizcainoa [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – № 33. – P. 3489–3492.
- [7] Ethanol steam reforming over Mg_xNi_{1-x}Al₂O₃ spinel oxide-supported Rh catalysts / F. Aupretre [et al.] // Journal of Catalysis. – 2005. – № 233. – P. 464–477.

Mitrofanov O., Snisar O., Zavgorodniy D., Bilogrud M., Bilyachat O.

Research on the effectiveness of thermochemical heat recovery of exhaust gases for an automobile engine

The results of a theoretical study on the application of thermochemical heat recovery of exhaust gases for an automobile engine with spark ignition are presented.

Keywords: internal combustion engine; exhaust gases; thermochemical heat recovery; operating cycle; effective indicators; thermochemical conversion reactor.

УДК 621.436

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА

*Митрофанов О. С., д-р техн. наук, проф.¹, Федик І. І., магістрант²,
Івасюк С. В., магістрант³, Магєррамов Р. А., магістрант⁴, Петков Ю. П.,
магістрант⁵*

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹mitrofanov.al.ser@gmail.com

Анотація. Представлено результати теоретичного дослідження та оптимізація налаштування паливної апаратури суднового малообертового двигуна типу 10ДКРН 96/250 за кутом випередження та загальною тривалістю процесу впорскування.

Ключові слова: малообертовий дизельний двигун; робочий цикл; паливна система; процес паливоподачі; випередження впорскування; тривалість упорскування.

Вступна частина. До сучасних головних малообертових суднових дизелів висувають все більш жорсткі вимоги щодо їх ресурсу роботи, надійності, безвідмовності, а також безумовно до паливної економічності, а також високої екологічності [1–3]. Паливна економічність суднового дизельного двигуна, а також частково і екологічність напряму залежить від оптимального налаштування та ефективної роботи паливної апаратури на кожному експлуатаційному режимі.

Одними з основних параметрів паливної системи суднового дизельного двигуна, що у значній мірі впливають на процес паливоподачі, сумішоутворення та, відповідно, згоряння є тиск, який забезпечує паливний насос високого тиску $p_{\text{пнвт}}$, тривалість паливоподачі $\varphi_{\text{вп}}$ та кут випередження впорскування $\varphi_{\text{вип}}$ [1–5].

Мета роботи – аналіз та дослідження впливу параметрів налаштування паливної апаратури на ефективні показники суднового малообертового двигуна.

Основна частина. Для забезпечення максимально сприятливих та ефективних умов паливоподачі у судновому дизелі Wärtsilä 10RT-flex-96C [4, 5] застосовується повний факторний експеримент у якому в якості факторів впливу виступають випередження впрыскування та загальна тривалість впрыскування. Для повного факторного експерименту з двома факторами кожен з яких має три рівні матимемо дев'ять варіантів співвідношень [6]. Після формування плану-матриці повного факторного експерименту здійснено серія розрахунків робочого циклу суднового малообертового дизеля Wärtsilä 10RT-flex-96C для номінального режиму роботи [7].

За результатами виконаних розрахунків та їх обробки отримано наступні графічні залежності зміни параметрів роботи суднового МОД (рис. 1–3).

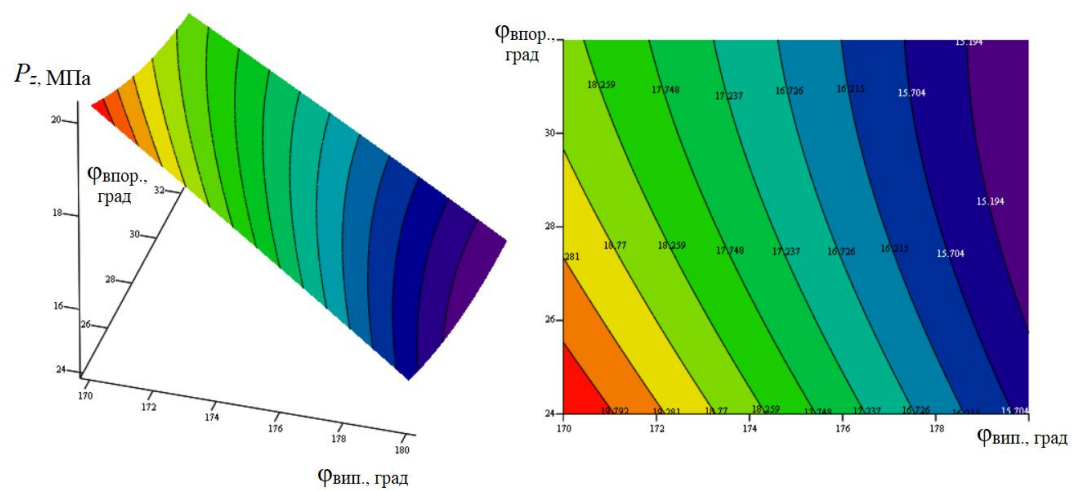


Рисунок 1 – Зміна максимального тиску від параметрів паливоподачі

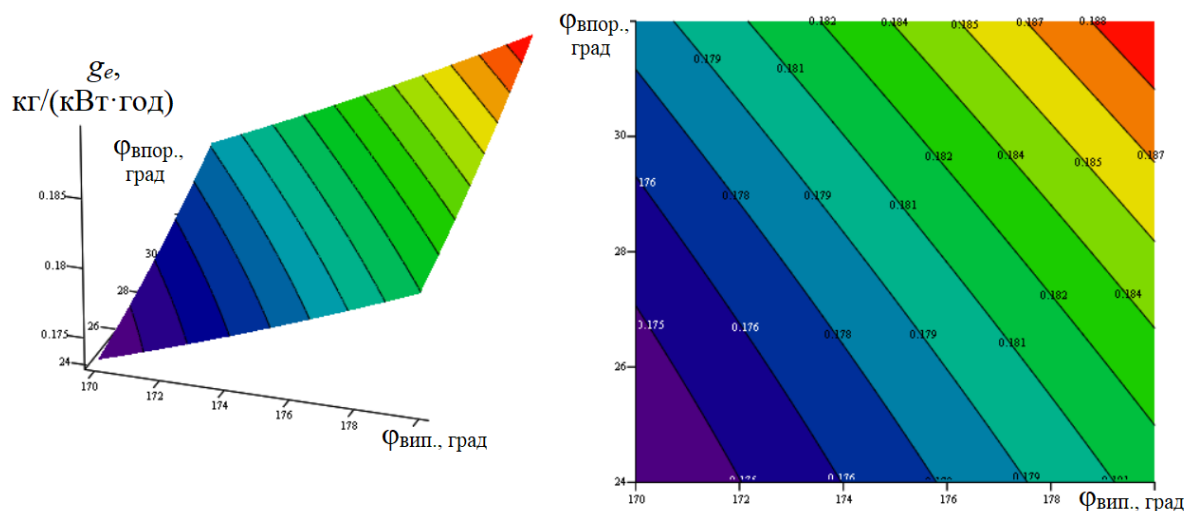


Рисунок 2 – Зміна питомої ефективної витрати палива дизеля Wärtsilä 10RT-flex-96C від параметрів паливopодачі

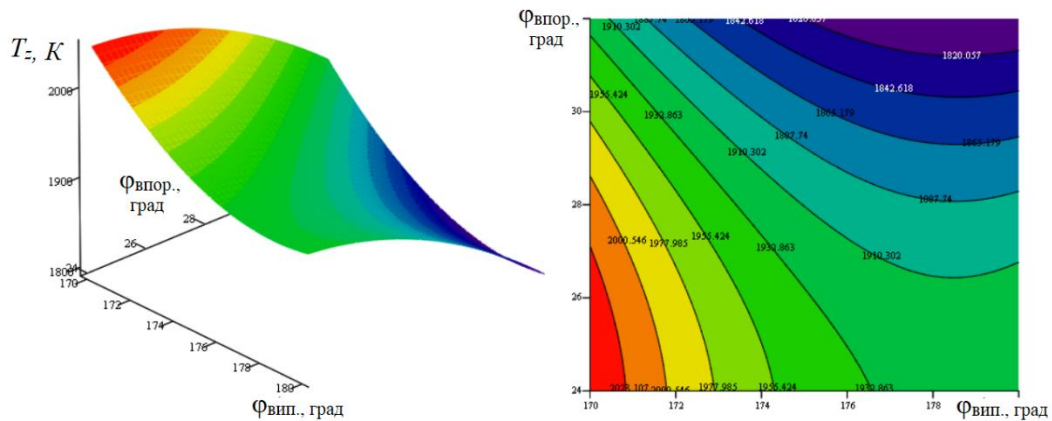


Рисунок 3 – Зміна максимальної температури циклу від параметрів паливopодачі

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити оптимальне поєднання кута випередження впорскування $\phi_{\text{вип.}}$ та загальної тривалості процесу впорскування $\phi_{\text{впор.}}$ за умов забезпечення закладених обмежень щодо максимальних тиску та температури процесу згоряння. Так, було встановлено, що оптимальне співвідношення складатиме – $\phi_{\text{вип.}} = 6,5^\circ$ до ВМТ та $\phi_{\text{впор.}} = 29^\circ$ п.к.в.

Висновки. 1. Виконано теоретичне дослідження та оптимізація налаштування паливної апаратури суднового МОД типу 10ДКРН 96/250 за кутом випередження та загальною тривалістю процесу впорскування. 2. Установлено, що встановлене оптимальне поєднання кута випередження впорскування $\phi_{\text{вип.}}$ та загальної тривалості процесу впорскування $\phi_{\text{впор.}}$ забезпечує зниження питомої ефективної витрати палива на рівні 1,8 г/(кВт·год).

Список літератури

- [1] Суднові двигуни внутрішнього згоряння: Підручник / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2015. – 332 с.
- [2] Наливайко В.С. Конструктивні вузли та системи суднових двигунів внутрішнього згоряння : навчальний посібник / В.С. Наливайко, Б.Г. Тимошевський. – Миколаїв : НУК, 2013. – 100 с.
- [3] Митрофанов О.С., Проскурін А.Ю. Основи експлуатації, обслуговування та ремонту двигунів внутрішнього згоряння : навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2018. 151 с.
- [4] Heywood John B. Internal Combustion Engine Fundamentals / John B. Heywood. - New York.: McGraw Hill New York, 1988. – 930 –. – ISBN 0-07-100499-8
- [5] Mollenhauer, K. Handbook of diesel engines / K. Mollenhauer, H. Tschoeke. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. –634 p.
- [6] Мінчев Д.С., Нагірний А.В. Лабораторні роботи з дисципліни "Інформаційні основи САПР ДВЗ". Частина 2 : методичні вказівки. Миколаїв: Видавництво НУК, 2012. – 100 с.
- [7] <http://blitzpro.zeddmalam.com/application/index/signin>

Mitrofanov O., Fedyk I., Ivasiuk S., Magherramov R., Petkov Yu.

Study of the influence of fuel system settings on the performance of a low-speed marine engine

The results of a theoretical study and optimization of the fuel system settings of a low-speed marine engine of the 10DKRN 96/250 type in terms of the advance angle and total duration of the injection process are presented.

Keywords: low-speed diesel engine; working cycle; fuel system; fuel supply process; injection advance; injection duration.

УДК 629.5.03

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА

Лисих А. Ю., к. т. н., доцент¹, Доценко С. М., к. т. н., доцент²

Климчук В. П., магістрант³, Цибулько Є. С., магістрант⁴,

Філінішин Б. В., магістрант⁵

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

¹ alla.lysykh@nuos.edu.ua, ² serhii.dotsenko@nuos.edu.ua

³ vibep1997@gmail.com, ⁴ tsibulko1997@gmail.com

⁵ rafalskuy@ukr.net

***Анотація.** Розглянуто засоби підвищення екологічності роботи суднових енергетичних установок за рахунок переводу їх на альтернативне паливо з відновлювальних джерел енергії.*

***Ключові слова:** дизельний двигун; суднова енергетична установка; токсичні компоненти.*

***Вступна частина.** На цивільних судах морського та внутрішнього водного транспорту як теплові двигуни в основному використовуються дизельні установки. Дизелі виконують функції як головних, так і допоміжних двигунів. Це пояснюється тим, що вони досить надійні, порівняно прості в експлуатації та мають високий коефіцієнт корисної дії. Істотним недоліком сучасних суднових поршневих двигунів є те, що переважна більшість з них працює на важких паливах одержаних з нафти [1].*

Жорсткість екологічних норм для суднових двигунів по вмісту у відпрацьованих газах токсичних речовин зробили використання важких палив менш привабливим, в першу чергу через наявність сполук сірки, яке веде до збільшення негативного впливу на навколишнє середовище [2].

***Мета роботи** – дослідження можливості зниження токсичних викидів шкідливих речовин суднових енергетичних установок за рахунок переводу їх на альтернативне паливо біологічного походження.*

***Основна частина.** Експлуатація суднових дизелів супроводжується неминучим забрудненням довкілля відпрацьованими газами, до складу яких входять токсичні компоненти –*

оксиди сірки SO_x , азоту NO_x та вуглецю CO . Оксиди сірки SO_x та азоту NO_x у подальшому конденсуються в повітрі та перетворюються в кислоти, які повертаються на поверхню Світового океану, острівну або материкову частину Землі. Монооксид вуглецю CO залишається в атмосфері та руйнує озоновий шар.

Одним із варіантів використання даного типу двигунів є перевід їх на альтернативне паливо з відновлювальних джерел енергії – рослинних олій (соняшникова, кукурудзяна, рапсова, пальмова, соєва тощо). Особливістю рослинних олій є наявність в їх складі достатньої великої кількості кисню (8...12 %). Це призводить до зниження їх теплоти згоряння. Так, нижча теплота згоряння рослинних олій складає 36...39 МДж/кг проти 42...43 МДж/кг у дизельних палив, які практично не містять кисню [3–4].

Використання рослинних олій в якості альтернативного палива дозволяє суттєво знизити залежність споживача від палив нафтового походження та покращити екологічні показники силової установки. Випробування щодо ефективності використання соєвої олії в якості палива проводились на стаціонарній установці промислового використання. Силowym агрегатом виступав дизельний двигун 6ЧН 26/34, що працює в складі серійного дизель-генератора ДГА-900 потужністю 900 кВт (рис. 1). Це двигун з безпосереднім впорскуванням палива в камеру згоряння нероздільного типу, газотурбінним наддувом та охолодженням наддувного повітря [5–6].



Рис. 1. Дизель-генераторна установка ДГУ-900

Проведений аналіз результатів роботи дизель-генератора при роботі на дизельному паливі і соєвій олії, показав що такі параметри робочого процесу дизеля як максимальний тиск згоряння і температура випускних газів на виході з циліндрів мають еквідістантний характер зміни кривих. В свою чергу, питома витрата соєвої олії збільшилася в середньому на 14–15 % в порівнянні з питомою витратою дизельного палива (рис. 2).

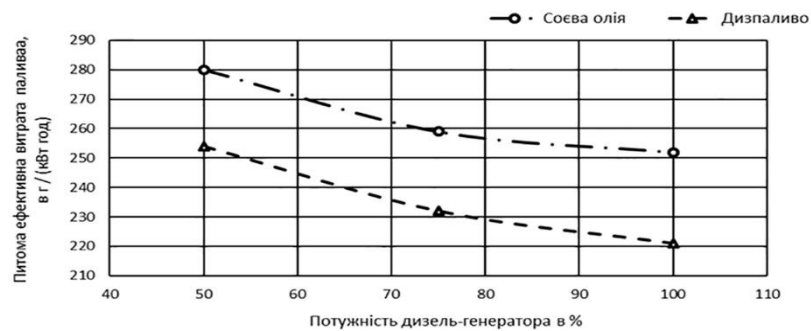


Рис. 2. Ефективна питома витрата дизельного палива і соєвої олії в залежності від навантаження

Завдяки незначній кількості сірки в рослинних оліях у відпрацьованих газах двигуна практично відсутні оксиди сірки. До других екологічних факторів можна віднести зниження викидів в атмосферу оксидів азоту NO_x , оксиду вуглецю CO , вуглеводнів які не згоріли CH_x та сажі C [7–9].

Висновки. Проведене дослідження доводить вплив величини ступіня охолодження наддувочного повітря на екологічні показники:

1. Ефективність використання палива біологічного походження, доцільно визначати за екологічним та економічним критерієм.
2. Використання палива біологічного походження, впливає на процес згоряння в циліндрі двигуна, що призводить до зміни термодинаміки процесу згоряння.
3. Використання палива біологічного походження залежно від режимів роботи дизеля забезпечує зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами та зменшення концентрації емісії вуглецю у випускних газах.

Список літератури

- [1] O. Cherednichenko, M. Tkach, B. Timoshevskiy, V. Havrysh, S. Dotsenko. Improving the efficiency of a gas-fueled ship power plant using a Waste Heat Recovery metal hydride system. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* № 59 (131) – 30.09.2019. – С. 9-15.
- [2] Білоусов Є.В. Теоретичні основи робочих процесів в суднових двигунах, що працюють на альтернативних паливах: монографія / Є.В. Білоусов; Національний технічний. університет "ХПІ" – Херсон: 2020 – 444 с.
- [3] Доценко С.М., Солодка А.Ю. Дослідження ефективності використання соєвої олії при роботі дизельного двигуна в складі когенераційної установки. *Наукові праці конференції «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування» Харків: ХНАДУ 2020* – С.182-185.
- [4] Доценко С., Ченчик Д., Чебаненко В. Альтернативні палива для дизельних двигунів з відновлювальних джерел енергії. VII Міжнародна науково - технічна конференція «Сучасний стан та проблеми двигунобудування». м. Миколаїв, НУК, 24-25.11. 2022 р. – С. 16-17.
- [5] I. Shvets, O. Hrabovenko, S. Dotsenko, V. Nesterenko. (2020). Results of the Experimental Research of the Medium Speed Diesel Engine Work on Soybean Oil. // *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means: - Kaunas, Lithuania, 2020* – Part, 1038p., ISSN 2351-7034 pp. 671-675.
- [6] О.І. Грабовенко, С.М. Доценко, В.В. Нестеренко, І.А. Швець. (2021). Використання рослинної олії в якості палив в середньо оборотному дизельному двигуні. Двигуни внутрішнього згоряння.– № 2., С. 79-86.

[7] S. Dotsenko, V. Nesterenko, A. Lysykh, O. Hrabovenko, I. Shvets Mathematical modelling of emissions of toxic components of a medium speed diesel engine when operating on soybean oil. // 27th International Scientific Conference on Transport Means 04-06.10.2023:—Palanqa, Lithuania, 2023. — Pages 921-929.

[8] Доценко С.М., Грабовенко О.І., Швець І.А., Лисих А.Ю. Експериментальні дослідження екологічних параметрів дизельного двигуна при роботі на соєвій олії. Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2023 — № 2-3 (491-492). — С. 49-56.

[9] Мадей В.В. Використання альтернативного палива в суднових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. — 2021. — Вип. 43. — Одеса: НУ «ОМА». — С. 45-53.

Lysykh A., Dotsenko S., Klymchuk V., Tsybulko E., Filipishyn B.

INCREASING THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF SHIP POWER PLANTS THROUGH THE USE OF ALTERNATIVE FUELS

Abstract. The means of improving the environmental friendliness of ship power plants by transferring them to alternative fuels from renewable energy sources are considered.

Keywords: diesel engine; ship power plant; toxic components.

УДК 629.5.03:62-8+629.5.078

**ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ СУДНОВИХ
ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ
ДВІЙНИКІВ**

Грицук І. В¹., Погорлецький Д. С²., Дзигар А. К³.,

Задорожний В. К⁴., Довбня П. Ю⁵., Гаврилюк В. В⁶

¹д. т. н., професор; ²к. т. н., доцент; ³ст. викладач; ^{4,5,6}магістрант

¹кафедра автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний Університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна

^{2,3}кафедра експлуатації суднових енергетичних установок

Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна

^{4,5,6}Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

Первомайський навчально-науковий інститут, м. Первомайськ, Україна

¹gritsuk_iv@ukr.net; ²dimon150582@gmail.com; ³anatoliidzygar@gmail.com;

⁴zadorozhnii.volodymyr.mmm@gmail.com; ⁵dovbnapasa@gmail.com; ⁶tedzoneknife@gmail.com

Анотація. Розглянуто особливості оцінювання стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки. Розроблена інформаційна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки. Обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: суднова енергетична установка, теплообмінник, система охолодження, цифровий двійник, система експлуатації.

Одним із шляхів вдосконалення суднових та транспортних енергетичних установок є підвищення ефективності у процесах перетворення теплової енергії в їхніх елементах [1]. Ці процеси підпорядковуються законам термодинаміки, гідрогазодинаміки та тепломасообміну і визначають ефективний коефіцієнт корисної дії установок, рівень теплових викидів та шкідливих викидів у відпрацьованих газах, ресурс та компактність й досконалість систем [2]. Значний вплив на зазначені показники мають теплообмінні апарати, які є невід’ємними елементами енергетичних установок [3].

Відомо, що техніко-економічні показники теплових енергетичних установок в значному визначаються параметрами теплового обладнання і теплообмінників. Необхідність удосконалення обладнання суднових енергетичних установок та зростання масових і габаритних показників теплових і теплообмінних апаратів визначають практичний запит на розробку, удосконалення і впровадження науково-технічних розробок і рішень для інтенсифікації процесів конвективного теплообміну [4]. Це спрямовано на комплексне покращення економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик обладнання, а також на зменшення витрати палива і теплових та шкідливих викидів.

Метою дослідження є обґрунтування особливостей оцінювання стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників суднової енергетичної установки.

В роботі для оцінювання параметрів технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників інформаційна система повинна була адаптована в умовах експлуатації на сталу роботу з отримання поточних даних. Аналітична складова системи за технологією цифрових двійників призначена для оцінки всіх граничних значень, формування раціональних і оптимальних характеристик та прогнозування значень параметрів технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації та забезпечення взаємодії з іншими системами транспортного судна і суднової енергетичної установки. Також, аналітична складова системи виконує дії для розрахунково-аналітичного формування відповідної складової виконання сталого контролю і, в цілому для забезпечення технічного стану вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів забезпечення всіх складових ефективностей експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо [3].

Цільовою функцією дослідження ($Q_{\Sigma}(t)$), а саме процесів підвищення ефективностей експлуатації ($Q(P_{esmpi}(t))$), проведення технічних обслуговувань ($Q(E_{mcosmpi}(t))$) та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин в умовах

експлуатації ($Q(E_{upfcsi}(t))$), буде вважатись поєднання як об'єктивних так і суб'єктивних експлуатаційних факторів експлуатації суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. Це забезпечує забезпечують працездатність всієї енергетичної системи судна і суднової енергетичної установки саме через мінімальне значення витрати палива (G_{Pt}). Об'єктивні фактори залежать від особливостей теплообмінників в частині: конструктивного виконання, площ теплообміну (кількості і якості пластин теплообмінника), витрату теплоносіїв (масову витрату в об'ємну витрату), коефіцієнтів тепловіддачі, товщини забруднення пластинчастого теплообмінника, швидкості теплообміну тощо. Суб'єктивні фактори системи залежать від технічного стану обладнання суднових теплообмінних апаратів, суднової енергетичної установки і судна, взагалі, і режимів управління, експлуатації, технічного обслуговування тощо. Крім цього функція повинна забезпечувати поєднання з іншими частинами запропонованого підходу.

Запропоновану функцію дослідження можливо представити у вигляді:

$$\begin{cases} Q_{i\Sigma}(t) = \Sigma(Q(P_{esmpi}(t)) + Q(E_{mcosmpi}(t)) + Q(E_{upfcsi}(t))) \rightarrow \max \\ Q(P_{esmpi}(t)) = F(F_{SMIsP}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{DUi}) \rightarrow \max \\ Q(E_{mcosmpi}(t)) = F(F_{SMIsP}, S_{OSPP}) \rightarrow \max \\ Q(E_{upfcsi}(t)) = F(F_{SMIsP}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{DUi}) \rightarrow \max \\ G_{Pt} \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

Особливістю запропонованої функції є те, що при її реалізації одночасно вирішується мінімалістична і максималістична тобто мінімаксна задача. Вирішуються одночасно така задача: забезпечення технічного стану $Q_{i\Sigma}(t)$ вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів гарантування ефективності експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо прагне досягти максимуму, при тому, що G_{Pt} прагне досягти мінімально можливих значень. При урахуванні факторів, що впливають на досягнення вказаних параметрів, можливо виділити конструкційні фактори і особливості вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах, їх технічний стан, фактичні умови експлуатації і режими управління (обслуговування і ремонту). Для використання в дослідженні методів і засобів дистанційного моніторингу планується виконати також аналіз особливостей його реалізації та дистанційного контролю параметрів технічного стану й визначення критеріїв покращення реалізації поставлених завдань в частині самих теплообмінних апаратів в умовах експлуатації засобами оперативного контролю на основі інтелектуальних і комунікаційних технологій. Процес оцінювання і прогнозування параметрів працездатності і технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі їх експлуатації на основі технології

цифрових двійників інформаційна система передбачає уточнення інформації про фактичний технічний стан суднових теплообмінних апаратів, методи й засоби їх оцінювання і прогнозування параметрів працездатності, про перспективи їх застосування при зміні умов експлуатації тощо.

В роботі об'єктом досліджень була суднова енергетична установка судна-танкера «Sti Fulham» (номер IMO 9688374, номер MMSI 538005400), яке призначено для перевезення нафти та хімікатів [5]. Суднова енергетична установка включає головний двигун 6S50ME-B. Досліджувані теплообмінні апарати суднової енергетичної установки розглядались для центральної системи охолодження головного суднового двигуна [6].

Для запобігання занадто високої температури охолоджуючого середовища повітреохолоджувача головного двигуна, розрахункова температура охолоджуючої води центральної системи охолоджуючої води повинна бути не вище 36 °C. Це відповідає найвищій температурі для заборотної морської води +32 °C [5, 6].

За рекомендаціями виробників [5, 6] для збереження сталої температури охолоджуючої води на вході в повітреохолоджувачі головного двигуна потрібно забезпечувати застосування як тільки максимально можливо нижчої температури рідини в центральній системі охолодження. Це означає, що температура охолоджуючої води системи на центральному регулюючому клапані повинна бути встановлена на мінімум 10 °C нижче від температури заборотної морської води [5]. Тобто різниця температур не повинна перевищувати +10 °C. При цьому виробник для всіх трубопроводів системи охолодження встановлює максимальні швидкості охолоджуючої води системі ~3,0 м / с.

Для реалізації функціоналу дослідження (1) дослідження проводились за 3 послідовними взаємопов'язаними етапами на створеній математичній моделі на основі технології цифрових двійників. Для дослідження спроможності пластинчастого теплообмінника центральної системи охолодження забезпечити експлуатацію головного двигуна суднової енергетичної установки для складних (змінних) умов експлуатації судна, а саме при переході в районах плавання (для прикладу): Північне море – Арабські Емірати, Перська затока. В такому випадку температура заборотної води змінюється в діапазоні від +15 °C взимку до +36 °C влітку (1-й етап). При цьому досліджувались граничні температури в центральній системі і вплив на її забезпечення конструктивних особливостей суднового пластинчастого теплообмінника (2-й етап дослідження). Крім цього, проводилось дослідження можливого засмічення системи в зоні теплообмінника і пошук шляхів забезпечення роботи пластинчастого теплообмінника при можливому забрудненні (3-й етап дослідження) [5, 6].

На рис. 1 наведені апроксимуючі рівняння для кожного варіанту дослідження для прогнозування можливих результатів в умовах експлуатації теплообмінного обладнання. З результатів розрахункового дослідження видно, що підвищення температури води заборотної морської при вході в теплообмінник призводить до істотних наслідків [3, 5, 6]. У результаті

підвищення температури заборотної води лише на 3,5 °С призводить найбільших витрат теплоносіїв.

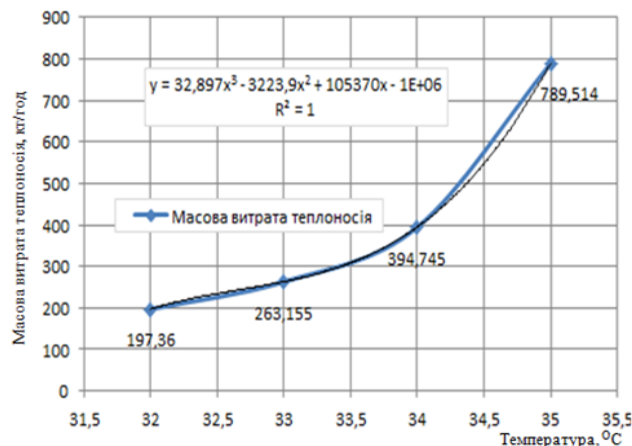


Рисунок 1 – Результати розрахункового дослідження суднового пластинчастого теплообмінника в частині зміни масової витрати теплоносія

Висновок. Обґрунтовані особливості оцінювання стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки. Розроблена інформаційна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки. Обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Література:

1. Zohuri B. Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. Switzerland: Springer International Publishing. 2017. 559 p. DOI: 10.1007/978-3-319-29835-1
2. Gritsuk, I., Mateichyk, V., Aleksandrov, V., Prilepsky, Y. et al., "Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators," SAE Technical Paper 2019-01-0906, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
3. Інноваційне теплообмінне обладнання [Текст] : монографія / І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 140 с.: іл. – Бібліогр.: с. 130–137.
4. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Shybaiev, D., Gritsuk, I. et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," SAE Technical Paper 2018-01-1738, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
5. STI FULHAM / <https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9688374>.
6. MAN B&W S50ME-B9.3-TII. IMO Tier II. Project Guide. –2014 - 302с.

FEATURES OF ASSESSING THE CONDITION OF SHIP HEAT EXCHANGERS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Gritsuk Igor Valeriyovych; Pohorletskyi Dmytro Serhiiovych; Dzygar Anatoly
Konstantinovich; Zadorozhny Volodymyr Konstantinovich, Dovbnya Pavlo Yuriyovych, Gavrylyuk
Vladislav Vitaliyovych

Chernihiv Polytechnic National University, Kherson State Maritime Academy, Admiral
Makarov National Shipbuilding University, Pervomaysky Educational and Scientific Institute

Abstract. Features of assessing the condition of ship heat exchangers in the operation system based on the technology of digital twins of a cargo ship and a ship's power plant are considered. An information system has been developed to implement the research tasks, which allows further research into the enlarged model of the representation of a digital twin of an intelligent cargo ship operation management system and ship power plant. The implementation of the studied application is justified in terms of practical methods for forming a digital twin to present the results of the operation of the ship's heat exchange equipment in real operating conditions.

Key words: ship power plant, heat exchanger, cooling system, digital twin, operation system.

УДК 621.436

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КРЕЙЦКОПФНОГО МЕХАНІЗМУ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Самарін О. Є¹, Кальченко В. В.², Нікітін В. Д.³,

Ковальчук О. В.⁴, Ляшук А. В.⁵, Прокопчук О. І.⁶

¹к. т. н. доцент; ²д. т. н. професор; ^{3,4,5,6}магістрант

¹кафедра експлуатації суднових енергетичних установок

Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна

²кафедра автомобільного транспорту та галузевого машинобудування

Національний Університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна

^{3,4,5,6}Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

Первомайський навчально-науковий інститут, м. Первомайськ, Україна

¹samarin162@gmail.com ; ²kalchenkovi@stu.cn.ua; ³vlad.nikiti97@gmail.com;

⁴kovalcuk0098@gmail.com; ⁵liashukartem8@gmail.com; ⁶sanya28042000@gmail.com

Анотація. Крейцкопфний механізм працює в умовах підвищених динамічних і термічних навантажень у продовж тривалого часу. При цьому зношення тертьових поверхонь між напрямними паралелями і повзуном призводить до необхідності їх заміни. Це вимагає зупинки двигуна судна та проведення трудомістких операцій по змінанню зношених частин і заміні їх на нові, що зменшує ефективність використання судна. Зниження трудомісткості обслуговування суднового дизельного двигуна є актуальною проблемою. Поставлено задачу створити такий крейцкопфний механізм, у якому зміна конструкції дозволяє зменшити витрати енергії при роботі двигуна і підвищити його потужність за рахунок заміни тертя між повзунами і напрямними паралелями на кочення, а також спростити систему мащення крейцкопфного

механізму і підвищити довговічність. Поставлена задача вирішується тим, що повзуни виконано у вигляді підшипників кочення, а між ними і напрямними паралелями встановлено мінімальний зазор. Виконання повзунів у вигляді підшипників кочення замінює тертя тіж повзунами і напрямними паралелями на кочення. Встановлення між повзунами і напрямними паралелями мінімального зазору забезпечує почергове притискання повзунів до лівої напрямної паралелі при робочому такті і до правої напрямної паралелі при зворотному такті, що запобігає затисканню повзуна між напрямними паралелями.

Ключові слова: крейцкопфний механізм, підшипник кочення, ковзання, повзун, напрямні паралелі.

Запропонована модернізація відноситься до галузі машинобудування, а саме до будування двигунів, і може бути застосована у двотактних крейцкопфних дизельних двигунах внутрішнього згоряння. Відомо крейцкопфний механізм, що містить шарнірно з'єднані шток поршня, шатун і два сектори з гладкими циліндричними поверхнями кочення, а також дві нерухомі, прямолінійні і розташовані одна паралельно іншій напрямні, кожна з яких пов'язана з гладкою циліндричною поверхнею кочення одного з секторів, причому кожен сектор і пов'язана з ним напрямна забезпечені відповідними їх формі зубчастими елементами, виконаними у вигляді зубчастого сектора і зубчастої рейки, діаметрів і поверхонь перекошування [1]. Недоліком цієї конструкції є недостатня довговічність, що пов'язана з прослизанням секторів відносно відповідних напрямних. Відомо крейцкопфний механізм для двигуна внутрішнього згоряння, який складається з плаваючої поперечки, яка оснащена маховиком і взаємодіючою з нею за допомогою обгінної муфти шестернею, що введена в зачеплення з нерухомою рейкою [2]. Недоліком конструкції є її недостатня довговічність через те, що при використанні погіршуються умови створення масляного клина між поверхнями, що труться, і, як наслідок, зменшується термін придатності підшипників. Найбільш близьким до запропонованої модернізації є крейцкопфний механізм, що складається з поперечки, до якої прикріплено шток та приєднано шатун і два повзуни, розташовані між лівими і правими напрямними паралелями [3]. Недоліками крейцкопфного механізму є те, що при русі уздовж напрямних паралелей повзуни труться по їх робочих поверхнях. При цьому виникає сила тертя, на подолання якої витрачається значна кількість енергії, що зменшує потужність двигуна. Крім того, існує необхідність постійного нанесення мастила на робочі поверхні повзунів і напрямних паралелей. Все це приводить до значного збільшення трудомісткості експлуатації та обслуговування двигуна. Крейцкопфний механізм працює в умовах підвищених динамічних і термічних навантажень у продовж тривалого часу. При цьому зношення тертьових поверхонь між напрямними паралелями і повзуном призводить до необхідності їх заміни. Це вимагає зупинки двигуна судна та проведення трудомістких операцій по змінанню зношених частин і заміні їх на нові, що зменшує ефективність використання судна. Зниження трудомісткості обслуговування судового дизельного двигуна є актуальною проблемою [3, 4].

Поставлено задачу створити такий крейцкопфний механізм, у якому зміна конструкції дозволяє зменшити витрати енергії при роботі двигуна і підвищити його потужність за рахунок заміни тертя між повзунами і напрямними паралелями на кочення, а також спростити систему мащення крейцкопфного механізму і підвищити довговічність. Поставлена задача вирішується тим, що повзуни виконано у вигляді підшипників кочення, а між ними і напрямними паралелями встановлено мінімальний зазор [5]. Виконання повзунів у вигляді підшипників кочення замінює тертя тіж повзунами і напрямними паралелями на кочення. Встановлення між повзунами і напрямними паралелями мінімального зазору забезпечує почергове притискання повзунів до лівої напрямної паралелі при робочому такті і до правої напрямної паралелі при зворотному такті, що запобігає затисканню повзуна між напрямними паралелями [5]. На рис.1,*а* показано крейцкопфний механізм при робочому такті двигуна, на рис. 1,*б* показано крейцкопфний механізм при зворотному такті двигуна. Крейцкопфний механізм складається з поперечки 1, до якої прикріплено шток 2 та приєднано шатун 3 і два повзуни 4, розташовані між лівими 5 і правими 6 напрямними паралелями. Повзуни 4 виконано у вигляді підшипників кочення, а між ними і напрямними паралелями 5 і 6 встановлено мінімальний зазор.

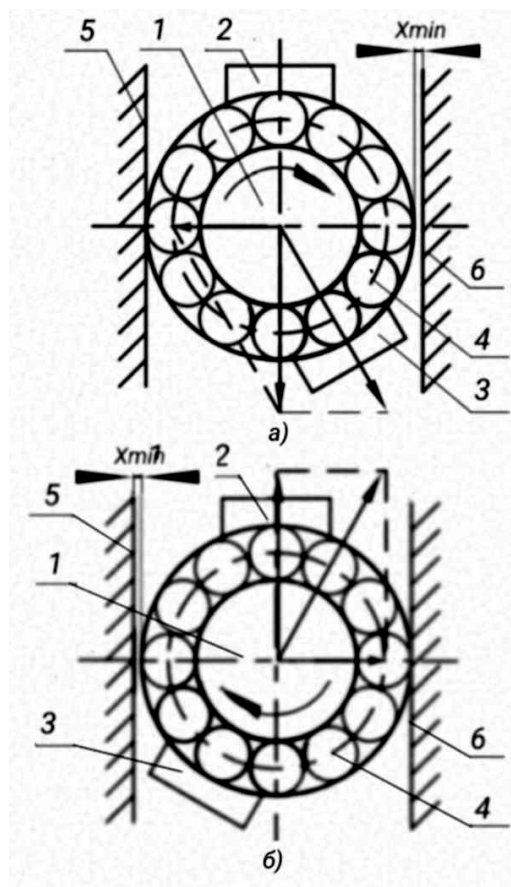


Рисунок 1 – Крейцкопфний механізм суднового малообертового дизеля: а) при робочому такті двигуна; б) при зворотному такті двигуна: 1 – поперечка; 2 – шток; 3 – шатун; 4

– повзуни у вигляді підшипників кочення; 5 – ліва напрямна паралель; 6 – права напрямна паралель

Крейцкопфний механізм працює наступним чином. При робочому такті сила зі штоку 2 передається на поперечку 1, де вона розділяється на дві складові - нормальну силу і силу, що діє уздовж шатуна 3. Нормальна сила притискає підшипники кочення 4 до лівих напрямних паралелей 5. При цьому підшипники кочення 4 обертаються за годинниковою стрілкою [5].

При зворотному такті сила з шатуна 3 передається на поперечку 1, де вона розділяється на дві складові - нормальну силу і силу, що діє уздовж штоку 2. Нормальна сила притискає підшипники кочення 4 до правих напрямних паралелей 6. При цьому підшипники кочення 4 також обертаються за годинниковою стрілкою. Таким чином, при кожному такті двигуна повзуни 4, що виконані у вигляді підшипників кочення, обкатуються по напрямних паралелях 5 і 6.

Висновок. Проведення модернізації дозволяє зменшити витрати енергії при роботі двигуна і підвищити його потужність за рахунок заміни тертя між повзунами і напрямними паралелями на кочення. Крім того, спрощується система мащення крейцкопфного механізму, що знижує трудомісткість її виготовлення та обслуговування. Модернізація може бути проведена в умовах виробника двигуна і застосована силами машинної команди при виконанні ремонтно-профілактичних робіт на судні. Запропоноване технічне рішення є універсальним і може бути застосоване на судах з двотактними малообертовими дизельними двигунами різної потужності.

Література:

1. Kuiken, K. (2017). *Diesel engines for ship propulsion and power plants* (3rd ed., Vol. 1). Target Global Energy Training.
2. Woodyard, D. (Ed.). (2009). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines* (9th ed.). Butterworth-Heinemann.
3. Возницький, І. В. (2008). *Суднові двигуни внутрішнього згоряння* (Т. 1).
4. Mollenhauer, K., & Tschöke, H. (Eds.). (2010). *Handbook of diesel engines*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89083-6>
5. Самарін, О. Є., Полив'янчук, А. П., Грицук, І. В., Погорлецький, Д. С., Петрук, Р. В., & Полив'янчук, Н. М. (2025). *Пат. 159706 Україна, МПК F16C 5/00. Крейцкопфний механізм* (№ u 2024 05706). ДП "Український інститут інтелектуальної власності".

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF THE CROSSHEAD MECHANISM OF A LOW-SPEED MARINE DIESEL ENGINE

Samarin Oleksandr Yevgenyevich; Kalchenko Volodymyr Vitaliyevich; Nikitin Vladyslav Dmytrovych; Kovalchuk Oleksandr Vasylovych, Lyashuk Artem Vasylovych, Prokopchuk Oleksandr Igorovych

Kherson State Maritime Academy, Chernihiv Polytechnic National University, Admiral
Makarov National Shipbuilding University, Pervomaysky Educational and Scientific Institute

The crosshead mechanism operates under conditions of increased dynamic and thermal loads for a long time. At the same time, wear of the friction surfaces between the guide parallels and the slider leads to the need to replace them. This requires stopping the ship's engine and carrying out labor-intensive operations to change worn parts and replace them with new ones, which reduces the efficiency of the ship's use. Reducing the labor-intensiveness of servicing a marine diesel engine is a pressing problem. The task is set to create such a crosshead mechanism in which a change in design allows reducing energy consumption during engine operation and increasing its power by replacing friction between the sliders and guide parallels with rolling, as well as simplifying the lubrication system of the crosshead mechanism and increasing durability. The task is solved by the fact that the sliders are made in the form of rolling bearings, and a minimum gap is set between them and the guide parallels. The execution of the sliders in the form of rolling bearings replaces the friction of the sliders and guide parallels with rolling. The installation of a minimum gap between the sliders and guide parallels ensures the alternate pressing of the sliders to the left guide parallel during the working stroke and to the right guide parallel during the return stroke, which prevents the slider from being jammed between the guide parallels.

Keywords: crosshead mechanism, rolling bearing, sliding, slider, guide parallels.

УДК 621.436

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ДИЗЕЛЯ

Самарін О. Є¹., Худяков І. В²., Пшеничний М. С³.,

Стукал В. О⁴., Філоненко Б. В⁵., Фролов І. С⁶.

^{1,2}к. т. н. доцент; ^{3,4,5,6}магістрант

^{1,2}кафедра експлуатації суднових енергетичних установок

Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна

^{3,4,5,6}Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

Первомайський навчально-науковий інститут, м. Первомайськ, Україна

¹samarin162@gmail.com; ²igor.khudiakov563@gmail.com; ³nikitapsenichij55@gmail.com;

⁴stukal1988@gmail.com; ⁵filonenkob0902@gmail.com; ⁶frolow200345@gmail.com

Анотація. Паливна система є однією з головних систем дизельного двигуна, від роботи якої залежить надійність і роботоздатність дизеля. Підвищення потужності дизельного двигуна є актуальною проблемою. Поставлено задачу модернізувати паливну систему високого тиску дизельного двигуна таким чином, в якій стиснуте повітря подається безпосередньо на струмін палива у момент його впорскування у циліндр двигуна, що сприятиме його потужності. При цьому створюється необхідна концентрація повітря у зоні подачі палива, що дозволяє зменшити надлишок повітря у циліндрі двигуна і його габаритні розміри. Крім того, інтенсивне перемішування палива з повітрям під час їх сумісного впорскування зменшує час на утворення

паливної суміші. Поставлена задача вирішується тим, що форсунка з'єднана з повітряним ресивером високого тиску, а у розпилювачі і голчастому клапані виконано порожнини, які утворюють золотниковий механізм, і додатково у розпилювачі виконано повітропровід з повітряними соплами, розташованими над паливними соплами. З'єднана форсунки з повітряним ресивером високого тиску і виконання у розпилювачі повітропроводу з повітряними соплами, розташованими над паливними соплами забезпечує подачу стиснутого повітря безпосередньо на струмінь палива. Виконання у розпилювачі і голчастому клапані порожнин, які утворюють золотниковий механізм, забезпечує синхронізацію впорскування палива і подачі повітря на струмінь палива.

Ключові слова: паливна система, форсунка, горюча суміш, тиск, паливо, повітря.

Запропонована модернізація відноситься до галузі будування двигунів і може бути застосована у дизельних двигунах внутрішнього згоряння. Відомо паливну систему дизельного двигуна внутрішнього згоряння [1], яка містить паливний бак, паливopідкачувальний насос, фільтри грубого та тонкого очищення палива, паливний насос високого тиску, які послідовно поєднані головним паливopроводом між собою та з форсунками двигуна. Недоліком паливної системи дизельного двигуна внутрішнього згоряння є те, що паливні фільтри неефективно видаляють з палива механічні домішки та воду, які потрапляючи до прецизійних пар паливної апаратури (плунжер-втулка та нагнітальний клапан-сідло клапана в паливному насосі високого тиску і голкаррозпилювач форсунки), що приводять до їх підвищеного абразивного та корозійного зношування, до різкого зниження техніко-економічних показників роботи дизеля і відповідно транспортного засобу. Відомо паливну систему проточного типу [2], яка містить паливний бак, паливopідкачувальний насос, фільтри грубого та тонкого очищення палива, паливний насос високого тиску, які послідовно поєднані між собою і з форсунками двигуна головним паливopроводом. Для контролю тиску в системі служить манометр, а для автоматичного скидання палива при перевищенні тиску – запобіжні клапани. В паливних фільтрах здійснюється видалення з палива механічних домішок та води. Причинами, які перешкоджають досягненню необхідного технічного результату є те, що постійна циркуляція палива по замкненому колу збільшує навантаження на засоби очищення, і при несвоєчасній заміні фільтруючих елементів знижується ефективність їх роботи, а при недостатній герметичності перепускного клапану можливий підсос неочищеного палива з паливного бака, що приводить до потрапляння у прецизійні пари паливної системи механічних забруднень та води і веде до їх інтенсивного абразивного і корозійного зношення [3]. Найбільш близьким аналогом є паливна система високого тиску дизельного двигуна, яка складається з форсунки, з'єднаної з паливним насосом високого тиску або паливним ресивером високого тиску з розподілювачем, що має розпилювач, у якому виконано паливopровід з паливними соплами і встановлено голчастий клапан [4]. Недоліками такої паливної системи високого тиску дизельного двигуна є те, що в зоні

впорскування палива з форсунки спостерігається підвищена концентрація палива і недостатня кількість повітря, необхідного для його згоряння. Враховуючи малий проміжок часу, відведений на згоряння впорскнутого палива, з'являється необхідність збільшувати кількість повітря у циліндрі двигуна, що веде до збільшення об'єму циліндра, а також діаметра повітропроводів і габаритів або кількості газотурбокомпресорів. З випускними газами також відходить певна кількість повітря з циліндру, яка не була використана при згорянні палива. Це призводить до збільшення діаметру газоходу. Крім того, фактори, що сприяють перетворенню рідкого палива на горючу суміш, а саме: швидкість впорскування палива, тиск і вихрові переміщення повітря у циліндрі, поступово діють на поверхневу частину і не торкаються його стрижня, який у продовж значного проміжку часу залишається рідким. Це унеможливує форсування процесу згоряння палива у циліндрі двигуна і підвищенню його потужності.

Паливна система є однією з головних систем дизельного двигуна, від роботи якої залежить надійність і роботоздатність дизеля. Найбільш близьким аналогом є паливна система високого тиску дизельного двигуна, яка складається з форсунки, з'єднаної з паливним насосом високого тиску або паливним ресивером високого тиску з розподільником, що має розпилювач, у якому виконано паливопровід з паливними соплами і встановлено голчастий клапан [4]. Недоліками такої паливної системи високого тиску дизельного двигуна є те, що в зоні впорскування палива з форсунки спостерігається підвищена концентрація палива і недостатня кількість повітря, необхідного для його згоряння. Враховуючи малий проміжок часу, відведений на згоряння впорскнутого палива, з'являється необхідність збільшувати кількість повітря у циліндрі двигуна, що веде до збільшення об'єму циліндра, а також діаметра повітропроводів і габаритів або кількості газотурбокомпресорів. З випускними газами також відходить певна кількість повітря з циліндру, яка не була використана при згорянні палива. Це призводить до збільшення діаметру газоходу. Крім того, фактори, що сприяють перетворенню рідкого палива на горючу суміш, а саме: швидкість впорскування палива, тиск і вихрові переміщення повітря у циліндрі, поступово діють на поверхневу частину і не торкаються його стрижня, який у продовж значного проміжку часу залишається рідким. Це унеможливує форсування процесу згоряння палива у циліндрі двигуна і підвищенню його потужності. Підвищення потужності дизельного двигуна є актуальною проблемою [4].

Поставлено задачу модернізувати паливну систему високого тиску дизельного двигуна таким чином, в якій стиснуте повітря подається безпосередньо на струмінь палива в момент його впорскування у циліндр двигуна, що сприятиме його потужності. При цьому створюється необхідна концентрація повітря у зоні подачі палива, що дозволяє зменшити надлишок повітря у циліндрі двигуна і його габаритні розміри. Крім того, інтенсивне перемішування палива з повітрям під час їх сумісного впорскування зменшує час на утворення паливної суміші.

Поставлена задача вирішується тим, що форсунка з'єднана з повітряним ресивером високого тиску, а у розпилювачі і голчастому клапані виконано порожнини, які утворюють

золотниковий механізм, і додатково у розпилювачі виконано повітропровід з повітряними соплами, розташованими над паливними соплами. З'єднана форсунки з повітряним ресивером високого тиску і виконання у розпилювачі повітропроводу з повітряними соплами, розташованими над паливними соплами забезпечує подачу стиснутого повітря безпосередньо на струмінь палива. Виконання у розпилювачі і голчастому клапані порожнин, які утворюють золотниковий механізм, забезпечує синхронізацію впорскування палива і подачі повітря на струмінь палива.

На рис.1 показано загальний вигляд паливної системи високого тиску дизельного двигуна. На рис. 2 показано впорскування палива і подача повітря високого тиску. Паливна система високого тиску дизельного двигуна складається з форсунки 1, з'єднаної з паливним насосом високого тиску або паливним ресивером високого тиску з розподільвачем 2, що має розпилювач 3, у якому виконано паливопровід 4 з паливними соплами 5 і встановлено голчастий клапан 6. Форсунка 1 з'єднана з повітряним ресивером високого тиску 7, а у розпилювачі 3 і голчастому клапані 6 виконано порожнини, які утворюють золотниковий механізм 8, і додатково у розпилювачі 3 виконано повітропровід 9 з повітряними соплами 10, розташованими над паливними соплами 5. Паливна система високого тиску дизельного двигуна працює наступним чином.

Паливо під високим тиском поступає з паливного насоса високого тиску або з паливного ресивера високого тиску з розподільвачем 2 у паливопровід 4 розпилювача 3 форсунки 1, піднімає голчастий клапан 6 і впорскується через паливні сопла 5.

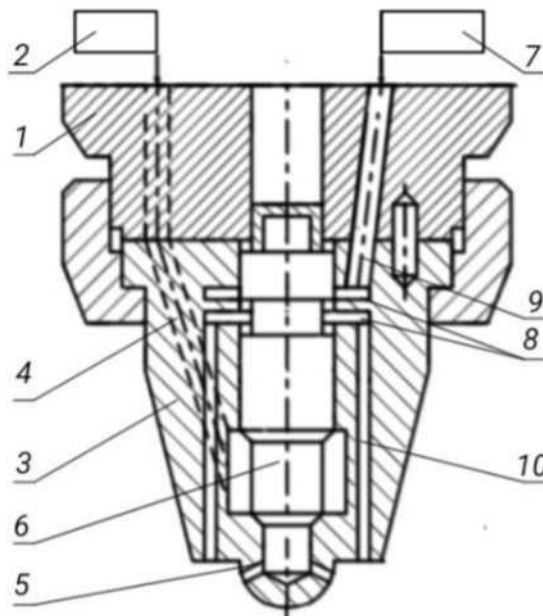


Рисунок 1 – Загальний вигляд паливної системи високого тиску дизельного двигуна: 1 – форсунка; 2 – паливний насос високого тиску або паливний ресивер високого тиску з розподільвачем; 3 – розпилювач; 4 – паливопровід; 5 – паливні сопла; 6 – голчастий клапан; 7 – повітряний ресивер високого тиску; 8 – золотниковий механізм; 9 – повітропровід; 10 – повітряні сопла



Рисунок 2 – Впорскування палива і подача повітря високого тиску

Водночас з цим відкривається золотниковий механізм 8 розпилювача 3 і повітря з повітряного ресивера високого тиску 7 подається через повітропровід 9 і повітряні сопла 10. Так як повітряні сопла 10 розташовані над паливними соплами 5, повітря інтенсивно змішується з паливом, утворюючи паливну суміш.

Висновок. Проведення модернізації забезпечує подачу стиснутого повітря безпосередньо на струмінь палива при його впорскуванні у циліндр двигуна і, таким чином, створює необхідну концентрацію повітря безпосередньо у зоні подачі палива, що дозволяє зменшити надлишок повітря у циліндрі двигуна і його габаритні розміри. Крім того, інтенсивне перемішування палива з повітрям під час їх сумісного впорскування зменшує час на утворення паливної суміші. Модернізація може бути проведена в умовах виробника двигуна і застосована при виконанні ремонтно-профілактичних робіт на судні. Запропоноване технічне рішення є універсальним і може бути застосоване на дизельних двигунах різної потужності.

Література:

1. Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2015). *Internal combustion engines: Applied thermosciences* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
2. Kuiken, K. (2017). *Diesel engines for ship propulsion and power plants* (3rd ed., Vol. 1). Target Global Energy Training.
3. Варбанець, Р. О. (2018). *Робочі процеси та системи суднових дизелів*. ОНМУ.
4. Woodyard D. *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. 9th ed. Oxford : Elsevier, 2009. 903 p.

IMPROVEMENT OF DIESEL FUEL SYSTEM DESIGN

Samarin Oleksandr Yevgenyevich; Khudyakov Igor Valentinovich; Pshenychnyy Mykyta Sergeevich; Stukal Vadim Oleksandrovych, Filonenko Bogdan Valerievich, Frolov Ilya Sergeevich
Kherson State Maritime Academy, Chernihiv Polytechnic National University, Admiral Makarov National Shipbuilding University, Pervomaysky Educational and Scientific Institute

The fuel system is one of the main systems of a diesel engine, on the operation of which the reliability and operability of the diesel engine depend. Increasing the power of a diesel engine is a pressing problem. The task is set to modernize the high-pressure fuel system of a diesel engine in such a way that compressed air is supplied directly to the fuel jet at the time of its injection into the engine cylinder, which will contribute

to its power. At the same time, the necessary air concentration is created in the fuel supply zone, which allows to reduce the excess air in the engine cylinder and its overall dimensions. In addition, intensive mixing of fuel with air during their joint injection reduces the time for the formation of the fuel mixture. The task is solved by the fact that the nozzle is connected to a high-pressure air receiver, and cavities are made in the atomizer and needle valve that form a spool mechanism, and additionally an air duct with air nozzles located above the fuel nozzles is made in the atomizer. Connecting the nozzle to the high-pressure air receiver and implementing an air duct in the sprayer with air nozzles located above the fuel nozzles ensures the supply of compressed air directly to the fuel jet. Implementing cavities in the sprayer and needle valve that form a spool mechanism ensures synchronization of fuel injection and air supply to the fuel jet.

Keywords: fuel system, nozzle, combustible mixture, pressure, fuel, air.

УДК 656.61.052:347.799.4

**ВПЛИВ СУЧАСНОГО МОРСЬКОГО ПІРАТСТВА НА БЕЗПЕКУ
СУДНОПЛАВСТВА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК: АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ КОНВЕНЦІЙ**

Діасамідзе Б. Т.¹, Кавіч М. І.², А. В. Борисов²

*¹PhD, викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та
теплоенергетики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,м.*

Миколаїв, Україна

²здобувачі вищої освіти, НУК

Анотація та ключові слова

Анотація. У роботі досліджено вплив сучасного морського піратства на експлуатаційні характеристики суднових енергетичних установок та їх енергоефективність. Проаналізовано сучасні кризові явища в ключових судноплавних регіонах, зокрема кризу в Червоному морі 2023-2024 років, як приклад взаємодії між безпековими загрозами та технічними аспектами роботи суден. Розглянуто три рівні протидії піратству – технічний, організаційний та силовий – у контексті міжнародних морських конвенцій. Встановлено, що піратські загрози та необхідність обходу небезпечних районів призводять до істотного збільшення витрат палива через зміни маршрутів та режимів експлуатації. Виявлено кореляцію між ефективністю систем управління безпекою та енергетичними характеристиками судна. Результати дослідження можуть бути використані для планів енергоефективної експлуатації суден з урахуванням безпекових ризиків.

Ключові слова: морське піратство, суднові енергетичні установки, енергоефективність, міжнародні конвенції, морська безпека, SEEMP.

Вступ. Сучасне судноплавство забезпечує понад 80 % світової торгівлі [1] і стикається з численними викликами, серед яких морське піратство та озброєні напади на судна залишаються

критичними чинниками безпеки. Дослідження останніх років свідчать про циклічний характер піратських загроз у різних регіонах світу [2, 3], при цьому географія ризикових зон постійно змінюється.

Особливо показовою є криза в Червоному морі 2023–2024 років, спричинена озброєними атаками на торговельні судна [4–6]. За даними супутникового моніторингу NO₂ (індикатор судноплавної активності) в акваторії Червоного моря знизився приблизно на 55 %, тоді як біля мису Доброї Надії зафіксовано зростання на 40 % порівняно з аналогічним періодом попереднього року.

Це підтверджує масштабне перенаправлення морського трафіку з традиційного маршруту через Суецький канал на обхідний шлях навколо Африканського континенту [7].

Економічні наслідки піратських інцидентів є багатовимірними та включають як прямі збитки від захоплення суден і викупу, так і непрямі втрати через підвищене споживання палива, збільшення страхових премій та затримки у доставці вантажів [8]. Зокрема, обхід африканським маршрутом подовжує відстань плавання на величину до 10 000 км, що еквівалентно додатковим 10–14 дням морського переходу [4].

Проблема виходить за межі безпосередніх безпекових загроз і безпосередньо впливає на фундаментальні принципи проектування та експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) [9]. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного розуміння взаємозв'язку між морською безпекою та енергоефективністю суден в умовах динамічних піратських загроз.

Постановка задачі та мета роботи. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності суднових енергетичних установок є врахування факторів морської безпеки при плануванні експлуатації та проектуванні суден. Водночас для практичного впровадження інтегрованого підходу необхідно дослідити специфічний вплив піратських загроз на режими роботи СЕУ та енергетичні показники судна.

Метою роботи є аналіз впливу сучасного морського піратства на енергоефективність суднових енергетичних установок та розробка рекомендацій щодо мінімізації енергетичних втрат в умовах безпекових загроз.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- проаналізувати вплив піратських атак і змін маршрутів на режими експлуатації СЕУ, витрати палива та стабільність навігації;
- дослідити три рівні протидії піратству в контексті міжнародних морських конвенцій;
- встановити взаємозв'язок між системами управління безпекою та енергоефективністю судна;
- розробити практичні рекомендації для підвищення енергоефективності в умовах безпекових загроз.

Методика досліджень. Дослідження базувалося на аналізі сучасних наукових публікацій [2, 9], звітів міжнародних організацій та документів ІМО [10]. Використовувався комплексний підхід, що включав:

- аналіз статистичних даних щодо піратських інцидентів та їх економічного впливу за період 2020–2024 років [8];
- дослідження технічних аспектів впливу безпекових заходів на роботу СЕУ;
- вивчення міжнародних конвенцій та їх імплементації в судноплавній практиці;
- аналіз сучасних кейс-студі, зокрема кризи в Червоному морі 2023–2024 років [4, 6].

Особлива увага приділялася визначенню якісних та кількісних показників впливу піратських загроз на споживання палива та енергоефективність суден на основі верифікованих даних.

Основні результати. Вплив піратських загроз на режими експлуатації СЕУ. Дослідження демонструють, що відхилення від оптимальних маршрутів через піратські загрози призводять до істотного збільшення витрат палива та викидів шкідливих речовин [11, 12]. Аналіз кризи в Червоному морі показує, що перенаправлення суден навколо мису Доброї Надії збільшує протяжність маршруту приблизно на 3500–4000 морських миль та час плавання на 10–14 діб [4].

Супутникові дані TROPOMI підтверджують збільшення викидів NO₂ на 40 % у районі Кейптауна внаслідок зростання інтенсивності судноплавства, що корелює із пропорційним зростанням споживання палива. Водночас у Червоному морі спостерігалось зниження рівня NO₂ на 55 %, а в районі Гібралтарської протоки – на 15 % [7].

Під час загрози піратського нападу або проходження небезпечних районів екіпажі активують аварійні протоколи згідно з рекомендаціями BMP5 (Best Management Practices) [13]: зміну курсу, збільшення швидкості до максимальних значень або, навпаки, маневри ухилення. Такі режими призводять до роботи СЕУ поза оптимальними параметрами, що негативно впливає на питоме споживання палива та прискорює зношування обладнання [14].

Активация захисних систем (освітлення, моніторингу, зв'язку) створює додаткове навантаження на допоміжні енергетичні установки. За різними оцінками, вимоги до резервування потужності для систем безпеки можуть становити від десятків до сотень кіловат залежно від класу судна та обраних технічних рішень.

Три рівні протидії піратству. Технічний рівень включає фізичне укріплення судна, встановлення бар'єрів (колючого дроту, протиштурмових огорож), систем раннього попередження (радары, термовізори), систем водяних гармат та сучасних засобів зв'язку. Впровадження таких систем вимагає додаткового енергопостачання, що має враховуватися при проєктуванні СЕУ.

- Організаційний рівень охоплює підготовку екіпажу, планування маршрутів з урахуванням ризик-зон, дотримання протоколів Best Management Practices (BMP5) [13], координацію з військово-морськими силами та регіональними центрами моніторингу. Ефективна

організація дозволяє мінімізувати негативний вплив безпекових заходів на енергоефективність шляхом оптимізації режимів роботи СЕУ.

- Силовий рівень включає залучення військово-морських сил для патрулювання та конвоювання, а також використання приватних озброєних охоронних команд PCASP – Private Contracted Armed Security Personnel) [15, 16]. Дослідження показують високу ефективність присутності озброєної охорони на борту у відверненні піратських атак, що дозволяє судну підтримувати оптимальні режими роботи СЕУ без екстрених маневрів.

Аналіз міжнародних конвенцій

- **Конвенція UNCLOS (1982)** встановлює правову основу для боротьби з піратством (статті 100–107) [17], проте має певні обмеження у визначенні піратства та механізмах правозастосування [18]. Стаття 101 обмежує визначення піратства лише актами у відкритому морі або поза юрисдикцією будь-якої держави, що не охоплює напади у територіальних водах. Незважаючи на це, UNCLOS сприяє створенню стабільних умов судноплавства через встановлення міжнародно-правових норм.

- **Конвенція SOLAS (1974/1988)**, зокрема Глава XI-2, інтегрує принципи енергоефективності з безпековими вимогами [10]. Конвенція встановлює стандарти резервування електроенергії та вимагає від суден наявності систем, здатних функціонувати в аварійних режимах, що безпосередньо впливає на параметри СЕУ.

- **Кодекс ISPS (2004)** вводить триступеневу систему безпеки з різними режимами роботи енергетичних систем [19]. На найвищому рівні безпеки судно повинне забезпечувати автономність роботи критичних систем протягом визначеного періоду, що вимагає відповідного резервування потужності СЕУ.

- **Конвенція SUA (1988)** встановлює механізми міжнародної співпраці у боротьбі з незаконними актами проти безпеки морського судноплавства [15]. Ефективна міжнародна координація сприяє зменшенню часу перебування суден у стані підвищеної готовності та дозволяє оптимізувати маршрути з урахуванням актуальної безпекової обстановки.

Взаємозв'язок енергоефективності та управління безпекою. Дослідження демонструють позитивну кореляцію між рівнем підготовки екіпажу та енергетичними характеристиками судна. Кваліфіковані екіпажі, які пройшли тренінги з інтеграції безпекових протоколів та принципів енергоефективного управління, здатні ефективніше реагувати на загрози без надмірних енергетичних втрат [20].

Впровадження інтегрованих систем управління, що поєднують SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) [20] з планами безпеки, показує перспективність у мінімізації енергетичних втрат. Такий підхід дозволяє заздалегідь моделювати сценарії проходження небезпечних районів та оптимізувати режими роботи СЕУ [14].

Підготовка екіпажу до ситуацій піратської загрози включає не лише безпекові аспекти, але й розуміння енергетичних наслідків різних тактик уникнення. Це дозволяє приймати збалансовані рішення, що забезпечують безпеку при мінімізації додаткового споживання палива.

Практичні рекомендації

1. **Інтеграція безпекових вимог у процес проєктування СЕУ.** Необхідність резервування додаткової потужності для систем безпеки має враховуватися на етапі проєктування. Конкретні параметри визначаються індивідуально залежно від класу судна, районів плавання та рівня ризику, виходячи з аналізу Best Management Practices та вимог класифікаційних товариств [10].

2. **Оптимізація планів SEEMP з урахуванням безпекових сценаріїв.** Включення в SEEMP сценаріїв піратських загроз дозволяє заздалегідь розрахувати оптимальні режими роботи СЕУ в умовах ризику, враховуючи можливість зміни маршруту, збільшення швидкості або необхідність роботи додаткових систем безпеки [20].

3. **Комплексна підготовка екіпажу.** Тренінги мають поєднувати безпекові протоколи згідно з BMP5 [13] та міжнародними конвенціями з принципами енергоефективного управління СЕУ [20]. Це дозволяє екіпажу приймати обґрунтовані рішення в критичних ситуаціях з урахуванням як безпеки, так і економічних аспектів.

4. **Використання цифрових технологій та моделювання.** Системи реального часу для моніторингу споживання енергії, інтеграція даних про безпекову обстановку з навігаційними системами та автоматизоване коригування режимів роботи СЕУ підвищують ефективність управління судном у небезпечних районах [12]. Застосування моделей оптимізації може значно підвищити ефективність планування маршрутів в обхід зон ризику [14].

5. **Координація з міжнародними ініціативами.** Участь у програмах convoy escort, координація з військово-морськими силами та обмін інформацією через регіональні центри моніторингу дозволяють оптимізувати маршрути та зменшити необхідність в екстрених маневрах [14].

Практична значимість роботи полягає у можливості оптимізації експлуатації СЕУ з урахуванням безпекових ризиків, що дозволить знизити витрати палива, підвищити надійність морських перевезень та забезпечити відповідність вимогам міжнародних конвенцій щодо енергоефективності та безпеки.

Висновки

Встановлено, що піратські загрози та необхідність обходу небезпечних районів призводять до істотного збільшення витрат палива через зміни маршрутів та режимів експлуатації суднових енергетичних установок. На прикладі кризи в Червоному морі 2023-2024 років показано, що обхідний маршрут навколо Африки подовжує відстань на 3500-4000 морських миль з відповідним зростанням споживання палива [7, 4].

Досліджено три рівні протидії піратству в контексті міжнародних конвенцій: технічний (захисні системи та обладнання), організаційний BMP5, підготовка екіпажу, координація) та силовий (військово-морські сили, приватна озброєна охорона) [15, 16, 13]. Ефективна інтеграція цих рівнів дозволяє мінімізувати негативний вплив на енергетичні характеристики СЕУ.

Виявлено позитивну кореляцію між рівнем підготовки екіпажу, ефективністю систем управління безпекою та енергетичними характеристиками судна. Комплексні тренінги, що поєднують безпекові протоколи з принципами енергоефективності, сприяють оптимізації роботи СЕУ у небезпечних районах [20].

Аналіз конвенцій UNCLOS [17], SOLAS [10], ISPS [19] та SUA [15] показав необхідність інтеграції принципів енергоефективності з безпековими вимогами на всіх рівнях судноплавної діяльності. Водночас виявлено певні обмеження існуючої правової бази, зокрема щодо визначення піратства та механізмів правозастосування [18].

Розроблено рекомендації щодо інтеграції безпекових вимог у процес проєктування СЕУ, оптимізації планів SEEMP з урахуванням піратських загроз та впровадження комплексної підготовки екіпажів. Впровадження цифрових технологій моніторингу та координації дозволяє підвищити ефективність управління судном у небезпечних районах [12].

ЛІТЕРАТУРА

- [1]. Qu S., et al. (2024). Modeling the dynamic impacts of maritime network blockage on global supply chains. *The Innovation*, 5(4), 100653. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100653>. (Перше згадування в тексті).
- [2]. Bueger C., Edmunds T. (2019). Piracy studies coming of age: a window on the making of maritime intervention actors. *International Affairs*, 95(5), 1037-1054.
- [3]. Marchione E., Johnson S.D. (2013). Spatial, Temporal and Spatio-Temporal Patterns of Maritime Piracy. *Journal of Research in Crime and Delinquency*, 50(4), 504-524.
- [4]. Bensassi S., et al. (2024). Challenges and Security Risks in the Red Sea: Impact of Houthi Attacks on Maritime Traffic. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1900. <https://doi.org/10.3390/jmse12111900>.
- [5]. Chen X., et al. (2024). The crisis in the Red Sea: the impact on China, world trade, shipping and navigation. *Journal of Innovative Research*.
- [6]. Papadimitriou S., et al. (2025). The Effect of the Israel-Gaza War on Maritime Trade and Transportation. *Marine Science and Technology Bulletin*, 14(2). <https://doi.org/10.47512/meujmaf.1697490>.
- [7]. Anichini G., et al. (2024). Shifts in Maritime Trade Routes as a Result of Red Sea Shipping Crisis Detected in TROPOMI NO₂ Data. *Geophysical Research Letters*, 51(20). <https://doi.org/10.1029/2024GL110491>.
- [8]. Bowden A., et al. (2010). *The Economic Cost of Maritime Piracy*. One Earth Future Foundation Working Paper.
- [9]. Hastings J.V. (2019). Marine Piracy: A Continuing Challenge. In: Geiss R., Petrig A. (eds) *Piracy and Armed Robbery at Sea*. Oxford: Oxford University Press.
- [10]. International Maritime Organization. (2004). *SOLAS Convention, Chapter XI-2: Special Measures to Enhance Maritime Security*. London: IMO.
- [11]. Psaraftis H.N. (2016). Two-step strategies towards fuel saving and emissions reduction onboard ships. *Ship Technology Research*, 63(3), 131-144.

- [12]. Qu S., et al. (2024). Modeling the dynamic impacts of maritime network blockage on global supply chains. *The Innovation*, 5(4), 100653. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100653>. (Повтор, але залишаю для збереження всіх джерел).
- [13]. International Chamber of Shipping. (2018). *Best Management Practices to Deter Piracy and Enhance Maritime Security in the Red Sea, Gulf of Aden, Indian Ocean and Arabian Sea (BMP5)*.
- [14]. Wang L., et al. (2024). Joint Ship Scheduling and Speed Optimization for Naval Escort Operations to Ensure Maritime Security. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1454. <https://doi.org/10.3390/jmse12081454>.
- [15]. Madjidian J., et al. (2020). The use of private maritime guards as an innovative means to fulfil states' duty to cooperate in the repression of maritime piracy. *International Journal of Maritime Crime & Security*, 1(1). <https://doi.org/10.21428/b8d2f5a3.7c8b5f6a>.
- [16]. Verschuren N., et al. (2021). The use of private maritime guards as an innovative means to fulfil states' duty to cooperate in the repression of maritime piracy. Part Two. *International Journal of Maritime Crime & Security*, 2(1).
- [17]. United Nations. (1982). *United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS). Articles 100-107: Piracy*. Montego Bay.
- [18]. Testa F., et al. (2022). A critical review of the global legal framework on piracy: 40 years after UNCLOS. *Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India*. <https://doi.org/10.1080/09733159.2022.2091020>.
- [19]. International Maritime Organization. (2004). *International Ship and Port Facility Security (ISPS) Code. Parts A and B*. London: IMO.
- [20]. Kuroshi L., et al. (2024). Exploring seafarers' knowledge, understanding, and proficiency in SEEMP: A strategic training framework for enhancing seafarers' competence in energy-efficient ship operations. *PLOS ONE*, 19(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309223>. (Включає також SEEMP).

Impact of Modern Maritime Piracy on Shipping Safety and Efficiency of Marine Power Plants: Analysis of International Conventions

Diasamidze B. T., Kavich M. I., Borisov A.V.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The paper investigates the impact of modern maritime piracy on operational characteristics of marine power plants and their energy efficiency. Contemporary crisis phenomena in key shipping regions, particularly the Red Sea crisis of 2023-2024, are analyzed as examples of interaction between security threats and technical aspects of ship operation [1]. Three levels of anti-piracy measures – technical, organizational and force-based – are examined in the context of international maritime conventions UNCLOS, SOLAS, ISPS and SUA. It is established that piracy threats and the necessity to avoid dangerous areas lead to significant fuel consumption increase due to route changes and operational regime modifications. A correlation between security management systems efficiency and ship energy characteristics is identified. The research results can be used for optimizing ship energy efficiency management plans considering security risks.

Keywords: maritime piracy, marine power plants, energy efficiency, international conventions, maritime security, SEEMP.

УДК 621.1

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Зубарев А. А.,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кондиціювання та рефрижерації НУК,

м. Миколаїв, Україна

anatoly.zubarev@nuos.edu.ua

Войтенко Є. О.,

аспірант НУК

e.voitenko@gmail.com

Анотація. Розглянуто методи зниження токсичності викидів з відпрацьованими газами двигунів суднових енергоустановок. Приведена загальна характеристика способів зниження токсичності відпрацьованих газів. На підставі проведеного аналізу розглянуто перспективи застосування технологій зниження кількості шкідливих речовин в енергетичних установках.

Ключові слова: рециркуляція відпрацьованих газів, відпрацьовані гази, судновий двигун, шкідливі викиди, екологія.

Стан проблеми та мета дослідження:

Зниження токсичності і частинок ВГ ДВЗ є складним науково-технічним завданням. Необхідність її вирішення диктується нормативно-законодавчими вимогами, які стають все більш жорсткими. Найчастіше їх виконання змушує знижувати економічні та енергетичні показники двигуна. Однак головні труднощі забезпечення екологічної безпеки ДВЗ пов'язані з селективністю компонентів ВГ. Іншими словами, способи зниження токсичності диференційовані по відношенню до шкідливих компонентів ВГ. Наприклад, заходи, спрямовані на зниження NOx, не роблять позитивного впливу на CO і CHx, а по відношенню до викидів сажі дають зворотний ефект. Тому вибір того чи іншого способу поліпшення екологічності ДВЗ завжди супроводжується пошуком компромісу між токсичністю, димністю, паливною економічністю і витратами на реалізацію способу.

Методи зниження викидів оксидів азоту і частинок прийнято поділяти на внутрішні (первинні) і зовнішні (вторинні). Ефективність різних способів зниження викидів NOx показана на рис. 1. На даному рис. 1 – організація робочих процесів; 2 – застосування природного газу; 3 – рециркуляція ВГ; 4 – використання водопаливної емульсії; 5 – зволоження наддувочного повітря; 6 – каталітичне очищення ВГ.

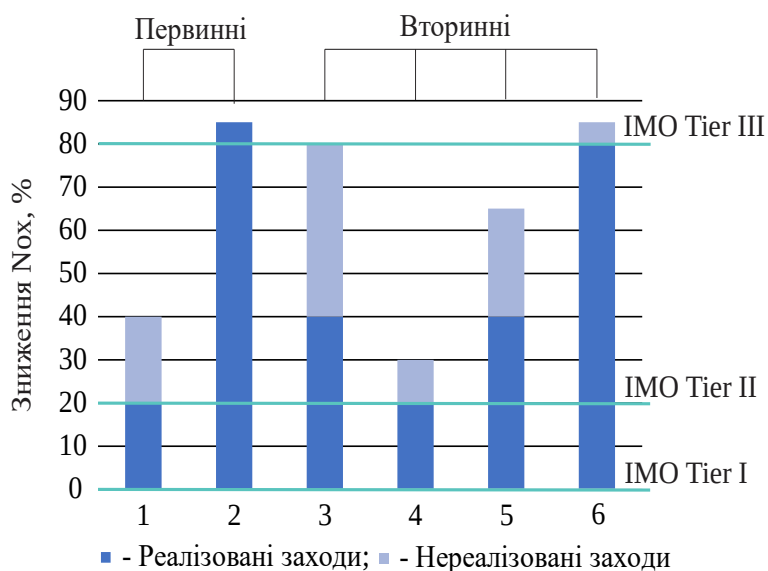


Рисунок 1 – Ефективність різних способів зниження викидів NOx

До внутрішніх методів належать ті, в яких зниження шкідливих викидів досягається за рахунок впливу на внутрішньоциліндрові процеси утворення шкідливих компонентів. Серед цих методів найбільше застосування отримали:

- підвищення максимального тиску згоряння;
- застосування багатодирчастих розпилювачів форсунок;
- підвищення тиску впорскування палива;
- множинне впорскування палива;
- оптимізація конструкції камери згоряння;
- оптимізація подачі повітря.

Серед зовнішніх способів зменшення шкідливих викидів з ВГ слід виділити наступні:

- очищення ВГ від шкідливих компонентів поза двигуном за допомогою спеціальних пристроїв і фільтрів;
- рециркуляція відпрацьованих газів;
- відновлення оксидів азоту в присутності спеціального каталізатора і при наявності відновника, в якості якого зазвичай використовується водний розчин сечовини.
- поліпшення якості палива і використання альтернативних палив.

Виконаний огляд літератури та отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

Для досягнення вимог IMO Tier 3 не завжди достатньо обмежитися тільки реалізацій внутрішніх способів. Всі вони спрямовані на управління процесом згорання і, в кінцевому рахунку, передбачають зниження максимальної температури згорання палива, так як з підвищенням цієї температури утворення оксидів азоту зростає.

Ефективність внутрішніх методів зниження шкідливих викидів з ВГ може бути достатньо високий, але вона досягається, як правило, за рахунок різних технологій.

Всі ці технології прямо або побічно пов'язані з конструктивними ускладненнями двигуна. Таких технологій в останнє десятиліття розроблено і освоєно виробниками суднових ДВЗ досить багато.

Для досягнення норм викидів по ІМО Tier 3 одних внутрішніх способів, швидше за все, буде вже недостатньо, і для виконання цих вимог додатково будуть потрібні зовнішні способи, наприклад, вони повинні бути до-заповнені системою SCR або системою рециркуляції. Тут слід нагадати, норми викидів Tier 3 діють в зонах регульованих викидів. Це дає підставу говорити про те, що судові двигуни повинні мати можливість перемикання роботи з режиму Tier 2 на Tier 3 і назад.

Серед методів покращення екологічних показників енергетичної установки зроблено увагу на системі рециркуляції відпрацьованих газів, що дозволяє досить доступно і ефективно впливати на утворення оксидів азоту та оксидів сірки в широкому діапазоні. Механізм впливу впливає з термічного характеру реакції окислення азоту або, простіше кажучи, оксиди NOx виходять тільки при високій температурі. Отже, знижуючи швидкість тепловиділення, тобто домагаючись, щоб процес згоряння палива протікав при більш низькій температурі, можна обмежити кількість NOx в ВГ.

Рециркуляція відпрацьованих газів уповільнює процес згоряння палива і, в кінцевому рахунку, призводить до різкого зменшення викидів NOx. Разом зі зменшенням оксидів азоту зростає вихід продуктів неповного згоряння (зокрема, сажі) і погіршується паливна економічність дизеля. Особливо відчутні ці супутні рециркуляції запобігати негативним явищам на повних навантаженнях. З цієї причини перепуск газів економічно виправданий лише на пайових режимах ДВЗ і при ступеня рециркуляції на рівні 12÷20 %. Зазвичай величину kR оптимізують шляхом управління перепускним клапаном в залежності від навантаження, частоти обертання, паливної економічності, концентрації NOx і C.

Зроблено припущення, що компенсація енергетичних втрат, спричинених рециркуляцією випускних (екологічних) газів, шляхом охолодження циклового повітря судових енергоустановок холодильними машинами, що утилізують теплоту випускних газів, включно з рециркуляційними (екологічними) газами, та надувного повітря, покладену в основу підходу до підвищення екологоенергетичної ефективності судової енергоустановки.

Література

1. Радченко Р. М., Пирисунько М. А. Зменшення викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами судових дизелів. Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2018. - № 5. - С. 36–41.
2. Радченко Р. М., Пирисунько М. А. Метод рециркуляції відпрацьованих газів судових дизелів для зменшення їх токсичності. Холодильна техніка та технологія. – 2018. – №. 54, №. 4. – С. 11-16. 3. Пирисунько М.А., Шевчук І.Ю., Проценко В.В., Філіпов С.В. Аналіз зменшення

токсичних викидів у відпрацьованих газах суднових дизелів. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Суднова енергетика: стан та проблеми». - Миколаїв: НУК. - 2019.

4. Пирисунько М.А., Вдовиченко Д.О., Сургаєв А.В. Огляд методів зменшення токсичних викидів у відпрацьованих газах суднових двигунів внутрішнього згоряння. VI Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та проблеми двигунобудування». - Миколаїв: НУК. - 2020. С. 69-72.

УДК 621.45.034:629.5

ОГЛЯДОВИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ТРАНСПОРТНОМУ ФЛОТІ

П. А. Рязанцев, аспірант

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

pricesf2501@gmail.com

Анотація. Представлено аналітичний огляд сучасного стану та перспектив використання низькотемпературних паливних елементів (ПЕ) у транспортних суднах. Проаналізовано технологічні рішення на основі PEMFC та AFC, що впроваджуються у морських та річкових судах для зниження викидів, підвищення енергоефективності та відповідності екологічним нормам ІМО. Розглянуто досвід впровадження водневих енергетичних систем у вантажних і суднах, а також наведено приклади їх потенційного використання у військовому флоті. Показано, що низькотемпературні ПЕ можуть стати ключовим елементом енергетичного переходу морського транспорту до нульових викидів.

Ключові слова: транспортні судна, паливні елементи, PEMFC, воднева енергетика, декарбонізація, морська енергетика.

Вступна частина. Міжнародна морська організація (ІМО) у стратегії 2023 року визначила ціль досягнення нульових викидів парникових газів у судноплавстві до 2050 року. Для виконання цих вимог суднобудівна галузь активно досліджує альтернативні джерела енергії, зокрема водень і технології паливних елементів.

Серед різних типів паливних елементів найбільш перспективними для морського транспорту є низькотемпературні PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells), які відзначаються високим ККД (до 55 %), низьким рівнем шуму, відсутністю шкідливих викидів і можливістю гібридної інтеграції з акумуляторами або дизель-генераторами [1, 2, 5].

Перші комерційні приклади використання ПЕ у транспортному флоті вже довели ефективність цієї технології – від пасажирських поромів до контейнеровозів середнього тонуажу [1, 4].

Ціль роботи – проведення аналітичного огляду стану впровадження низькотемпературних паливних елементів у транспортних суднах та оцінка їхнього потенціалу для комерційного використання.

Особливу увагу приділено технічним і експлуатаційним аспектам роботи систем PEMFC у морських умовах, екологічним перевагам, проблемам масштабування та перспективам гібридних енергетичних комплексів, які поєднують паливні елементи з традиційними двигунами внутрішнього згоряння.

Основна частина.

Світовий досвід впровадження у транспортному флоті

1. Пасажирські та поромні судна. Одним із перших прикладів стала MF Hydra (Норвегія) – пасажирський пором з двома модулями Ballard FCwave по 200 кВт, який працює на рідкому

водні [1]. Судно здійснює регулярні рейси з нульовими викидами CO₂ та NO_x, що підтвердило придатність PEMFC для комерційної експлуатації.

Схожу технологію реалізовано на Sea Change (США) – пасажирському катамарані з системою потужністю 360 кВт, розробленою компанією Zero Emission Industries [2].

Європейський проєкт FLAGSHIPS, за участю ABB та Wärtsilä, передбачає встановлення PEMFC на річковому буксирі у Франції потужністю 400 кВт [3].

2. Вантажні та допоміжні судна

Використання низькотемпературних паливних елементів у вантажному флоті наразі перебуває на стадії активних досліджень і демонстраційних проєктів. Основна увага приділяється гібридним енергетичним установкам, де паливні елементи виконують роль джерела базового живлення, а пікові навантаження покриваються акумуляторними батареями або дизель-генераторами. Така комбінація дозволяє скоротити споживання палива на 30–60 %, підвищити ККД системи до 50–55 % і забезпечити відповідність вимогам IMO MARPOL Annex VI та FuelEU Maritime Regulation [3, 6].

Одним із найбільш відомих демонстраційних проєктів є Toshiba Energy Systems & Solutions у співпраці з NYK Line (Японія), де створено судновий модуль PEMFC потужністю 300 кВт, призначений для допоміжного живлення контейнеровозів середнього тоннажу [4]. Система складається з шести паливних стеків Toshiba PURECELL, що живляться стисненим воднем (CH₂) при тиску 350 бар. Електроенергія подається на головний розподільний щит судна через DC/AC перетворювач, забезпечуючи живлення навігаційних систем, допоміжних насосів та освітлення. У ході морських випробувань у 2024 р. було досягнуто стабільної роботи протягом понад 1000 годин без деградації мембрани, а економія дизельного палива становила близько 12 %.

Іншим прикладом є спільний проєкт Kawasaki Heavy Industries і Japan Engine Corporation, у межах якого створено демонстраційний гібридний енергетичний модуль потужністю 500 кВт для балкерів і Ro-Ro суден [4]. Установку побудовано за схемою «Fuel Cell + Battery + DC Bus». Паливні елементи забезпечують базове навантаження (до 400 кВт), тоді як літій-іонна батарея місткістю 1,2 МВт·год покриває короткочасні пікові споживання. Система використовує зріджений водень (LH₂) при температурі –253 °С, зберігаючи його у двошаровому вакуумному резервуарі з багатошаровою ізоляцією. Отриманий водень подається до риформера з регулюванням тиску і температури, а надлишкове тепло реакції використовується для підігріву води у допоміжних системах судна, що дозволяє досягати сумарного ККД понад 60 %.

Низка компаній, серед яких DNV, Ballard Power Systems та Nedstack, ведуть випробування на судах допоміжного флоту – буксирах, технічних судах і баржах. Наприклад, у рамках програми H2SHIPS (ЄС, 2025) реалізується проєкт Hydrogen Tug, де дві установки Ballard FCwave потужністю по 200 кВт забезпечують повне електричне живлення портового буксира в Амстердамі [5]. Енергосистема працює на стисненому водні при тиску 350 бар, а відпрацьоване тепло паливних елементів використовується для підігріву кабіни екіпажу й систем розморожування палуби. За результатами випробувань буксир продемонстрував можливість безперервної роботи протягом 8 годин без дозаправлення.

Також компанія Nedstack Fuel Cell Technology (Нідерланди) у партнерстві з Heerema Marine Contractors створила морський енергетичний модуль Protonic Marine 250, що складається з десяти стеків PEMFC сумарною потужністю 250 кВт. Його випробовують на судах постачання офшорних платформ у Північному морі [5]. Система здатна працювати як у чисто водневому, так і в гібридному режимі з дизельним генератором, зменшуючи викиди CO₂ на 40 % при одночасному зниженні рівня шуму на 20 дБ.

Таким чином, для вантажних і допоміжних суден низькотемпературні паливні елементи сьогодні розглядаються не як експериментальна, а як перехідна технологія між традиційними двигунами внутрішнього згоряння та повністю електричними установками. Їхні переваги – модульність, екологічність і сумісність з існуючими системами – роблять їх реальним рішенням для поетапного переходу морського транспорту до вуглецевої нейтральності.

3. Використання у військовому флоті

Хоча основний розвиток відбувається у комерційному секторі, військові флоти вже мають багаторічний досвід застосування PEMFC у системах повітронезалежної енергетики. Підводні човни типу 212A (Німеччина, Італія) використовують AIP-системи на базі Siemens PEMFC

потужністю 9×30 кВт, що забезпечують до трьох тижнів автономності [6]. Цей досвід є важливою базою для вдосконалення технологій і адаптації їх до цивільного транспорту.

Технічні та експлуатаційні переваги

Низькотемпературні паливні елементи мають низку характеристик та переваг:

- Високий ККД (до 55 %) і стабільна робота при змінних навантаженнях [1, 5].
- Відсутність шкідливих викидів: продукти реакції – лише вода, що дозволяє відповідати вимогам MARPOL Annex VI [6].
- Низький рівень шуму та вібрацій, що підвищує комфорт пасажирів і знижує вплив на морське середовище.
- Модульність і масштабованість – можливість інтеграції в суднові енергетичні системи різного класу [2].
- Гібридна сумісність з літій-іонними батареями або дизель-генераторами для підвищення ефективності.

Проблеми та виклики

Попри успішні випробування, існує низка технічних бар'єрів:

- Висока вартість каталізаторів (переважно на основі платини) та необхідність високої чистоти водню [5].
- Складність зберігання палива – рідкий водень потребує температур -253°C , що обмежує масштабування систем [3].
- Обмежена інфраструктура для бункерування H_2 у більшості портів [4].
- Регламентні бар'єри – відсутність уніфікованих стандартів для сертифікації суден на водневих системах, хоча ІМО вже розробляє Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Hydrogen as Fuel [6].

Перспективи розвитку

Подальший розвиток низькотемпературних ПЕ спрямований на три ключові напрями:

1. Підвищення ресурсу за рахунок нових мембран (Nafion XL, Aquivion, Fumapem) і недорогих каталізаторів на основі сплавів Pt-Co та Pt-Ni [5].
2. Перехід до альтернативних палив – амоніак (NH_3) та метанол (CH_3OH) як носії водню з риформінгом безпосередньо на борту, що знижує ризики зберігання [1, 3].
3. Інтеграція у гібридні енергетичні комплекси, де ПЕ працюють у базовому режимі, а батареї або дизель-генератори покривають пікові навантаження [2].

У перспективі до 2035 р. очікується комерційна поява середньотонажних суден із повністю водневою енергосистемою, а також розширення практики використання ПЕ у портових буксирах, поромках і допоміжних кораблях [2, 3, 5].

Висновки. Низькотемпературні паливні елементи є однією з найперспективніших технологій декарбонізації морського транспорту. Їхнє впровадження у транспортні судна дозволяє зменшити викиди, підвищити енергоефективність і відповідати глобальним екологічним стандартам.

Досвід експлуатації у військовому флоті підтверджує надійність і довговічність цих систем у складних умовах, що відкриває шлях до масштабного використання у комерційних суднах.

Подальший розвиток водневої інфраструктури, зниження вартості паливних елементів і створення нормативної бази стануть ключовими факторами для широкого впровадження цієї технології у транспортному флоті до середини XXI століття.

Список літератури

1. Ballard Power Systems. FCwave Marine Fuel Cell Module. 2024.
2. Zero Emission Industries. Sea Change Hydrogen Ferry Project Report. DOE, 2024.
3. FLAGSHIPS Consortium. Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Inland Vessels. 2025.
4. Toshiba Energy Systems & Solutions. Large-Scale Hydrogen Fuel Cells for Shipping Applications. 2024.
5. Foniok K. et al. Mechanisms and Modelling of Degradation Processes of PEM Fuel Cells. Energies, 2025, 18, 2117. <https://doi.org/10.3390/en18082117>

6. IMO CCC 11. Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Hydrogen as Fuel. London: International Maritime Organization, 2025.

Riazantsev P.

Overview analysis of the use and possibilities of low-temperature fuel cells in the transport fleet

An analytical review of the current state and prospects for the use of low-temperature fuel cells in transport vessels is presented. Technological solutions based on PEMFC and AFC, which are implemented in sea and river vessels to reduce emissions, increase energy efficiency and comply with IMO environmental standards, are analyzed. The experience of implementing hydrogen energy systems in cargo and ships is considered, and examples of their potential use in the military fleet are also given. It is shown that low-temperature FC can become a key element of the energy transition of maritime transport to zero emissions.

Keywords: transport vessels, fuel cells, PEMFC, hydrogen energy, decarbonization, marine energy.

УДК 629.543:621.43.05

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГОЛОВНИХ ДВИГУНІВ LNG-ТАНКЕРІВ

Наливайко В. С., к. т. н., проф. НУК¹,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Авдюнін Р. Ю., викладач²,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Бойцов О. О., здобувач вищої освіти³,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

¹vasyl.nalyvaiko@nuos.edu.ua; ²roman.avdiunin@nuos.edu.ua; ³oleksandr8385@gmail.com

Анотація. У роботі наведено розрахункову методику визначення потужності головних двигунів метановозів з урахуванням змінного утворення BOG та експлуатаційних умов. Запропоновано формули та номограму, що забезпечують оперативну оцінку необхідної потужності за ключовими параметрами: вантажомісткість, середня добова випаровуваність, склад газу, частка рідкого запального палива та ефективність установки. Окремо проаналізовано переваги й обмеження графічних методів порівняно з цифровими моделями, зокрема їхню наочність і швидкість орієнтовної оцінки, а також потребу в калібруванні та адаптації для сучасних двотактних двопаливних двигунів.

Ключові слова: LNG, BOG, BOR.

Перші метановози, що з'явилися у середині XX століття, використовували паротурбінні установки, де випаруваний газ (boil-off gas, BOG) спалювався у котлах. Така схема дозволяла утилізувати неминучі втрати вантажу, проте відзначалася низьким коефіцієнтом корисної дії та високими витратами палива. У 1980–1990-х роках почали впроваджуватися дизельні двигуни середньо- та малообертового типу, здатні працювати на рідкому паливі з частковим додаванням випаруваного газу. Це стало важливим кроком до підвищення економічності та екологічності суднових енергетичних установок [1].

На судах-метановозах для роботи головних двигунів як паливо використовується частина зрідженого газу, що випаровується, з тієї чи іншої кількості рідкого палива. Тому потужність головних двигунів, яка може бути отримана при використанні цього газу, коливатиметься в широких межах залежно від кількості скрапленого газу, що перевозиться, частки газу, що випаровується, його теплотворної здатності та інших факторів. Це зумовлено комплексом чинників, серед яких [2, 3]:

- обсяг перевезеного ЗПГ, що визначає потенційний обсяг випаровувань;
- частка газу, що переходить у парову фазу, яка залежить від термодинамічних умов зберігання (температури, тиску, теплоізоляційних характеристик танків);
- теплотворна здатність газу, що може варіювати залежно від складу природного газу (вмісту метану, етану та інших компонентів);
- експлуатаційні режими суднової енергетичної установки, включно з навантаженням двигунів, тривалістю рейсу та швидкісними характеристиками;
- зовнішні фактори, такі як кліматичні умови плавання, температура навколишнього середовища та інтенсивність теплообміну з морською водою.

Boil-off gas (BOG): утворений газ має тиск, який необхідно контролювати для безпеки. Його обсяг зазвичай становить 0,1–0,15 % від маси вантажу на добу (залежно від типу ізоляції та конструкції танків). Таким чином, гранично допустима потужність двигуна визначається не лише гідродинамікою корпусу, а й здатністю системи ефективно утилізувати або повернути BOG [3].

Типові значеннями середньої добової випаровуваності (BOR) для різних конструкцій LNG-танків наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Типові значеннями середньої добової випаровуваності для різних конструкцій LNG-танків

Конструкція LNG-танка	Середня добова випаровуваність (BOR), %/day
Сферичні Moss	~ 0,15 %/day
Мембранні GTT NO96	~ 0,125 %/day
Мембранні GTT Mark III	~ 0,10 %/day

Вищенаведені дані безпосередньо впливають на економіку рейсу: менші втрати вантажу → менша потреба в утилізації BOG → більший обсяг LNG у порту призначення.

Метою цієї роботи є оцінка гранично допустимих потужностей головних двигунів і виявлення впливу основних факторів, специфічних для суден-метановозів. При цьому розглядаються переважно малообертові двигуни внутрішнього згоряння з прямою передачею потужності на гвинт [4].

Кількість газу, що випарувався, на добу можна визначити з виразу:

$$W_{\text{доб}} = k \cdot \alpha \cdot P_w \text{ [нм}^3\text{/добу]} \quad (1)$$

де P_w – net registered tonnage, м^3 ; α – середня добова випаровуваність, $\text{м}^3\text{/добу}$; k – коефіцієнт, чисельно рівний збільшенню об'єму природного газу при переході із рідинного стану в газоподібне при атмосферному тиску, приймаємо, $k = 625$ – для метанів та природних газів, що у своєму складі містять метан.

Приймаємо, що весь газ випаровувався при експлуатації судна та використовується для роботи головних двигунів з додаванням відповідної кількості рідкого палива.

При питомій витраті палива на головний двигун $g_{e\Gamma}$ $\text{нм}^3\text{/кВт}\cdot\text{год}$ та потужності головного двигуна Ne , добова витрата газу складе:

$$W_{\text{доб}} = 24 \cdot g_{e\Gamma} \cdot Ne \text{ [нм}^3\text{/добу]} \quad (2)$$

Зіставляючи вирази (1) та (2) визначимо потужність головного двигуна:

$$Ne = \frac{625\alpha \cdot P_w}{24 \cdot g_{e\Gamma}} \text{ [кВт]} \quad (3)$$

Для двигунів внутрішнього згоряння, працюючих на газі з додаванням рідкого запалювального палива (газорідинний цикл), питома витрата палива визначається:

$$g_{e\Gamma} = \frac{3600(1-q)}{\eta_e Q_H} \text{ [нм}^3\text{/кВт}\cdot\text{год]} \quad (4)$$

де q – частка тепла від рідкого запального палива, від всієї кількості теплоти, що фактично приймає участь в процесі; η_e – ефективний ККД двигуна; Q_H – нижча теплота згоряння газу, кДж/нм^3 .

З урахуванням (4) вираз для потужності ГД матиме наступний вигляд:

$$Ne = 0,00725 \frac{\alpha P_w Q_H}{1-q} \text{ [кВт]} \quad (5)$$

Для отримання закінченого виразу для визначення Ne необхідно ввести коригуючий коефіцієнт β , що враховує зменшення потужності двотактних газорідинних двигунів через можливу детонацію в циліндрі двигуна при малих частках тепла q , що вноситься із рідким паливом. Як показують дослідження, проведені фірмою «Зульцер» на двигуні RNMD-90, при

5 % відсотках тепла з рідким паливом можливе досягнення 76 % номінальної потужності чисто дизельного циклу, а при збільшенні частки тепла із запальним паливом до 30 % вдалось досягти номінальної потужності. В межах зміни q від 0,05 до 0,30 коефіцієнт зниження потужності β для двигунів RMD-76 та RNMD-90 фірми «Зульцер» згідно дослідних даних може бути представлено наступним чином:

$$\beta = 0,975q + 0,71. (6)$$

При $q \geq 0,30$ необхідно приймати значення β постійним, або рівним одиниці.

В першому наближенні, ці данні можна використовувати на інші типи двотактних газорідинних двигунів великої потужності.

Таким чином, з урахуванням вище переліченого формула для визначення максимально обмежених значень потужності головних двигунів суден-метановозів буде мати вигляд:

$$Ne = 0,00725 \frac{\alpha P_w \eta_e Q_H}{1 - q} (0,975q + 0,71) [\text{кВт}]. (7)$$

Величини, що входять в формулу (7) мають досить широкі межі значень. Так, середнє добове значення випаровуваності залежить від конструктивних особливостей танків, умов та районів плавання та інших факторів, приймаємо в межах 0,001–0,003. Значення P_w може бути від 25 до 125 тис. м³, що є результатом аналізу сучасного стану морських перевезень скраплених природних газів та перспектив їх подальшого розвитку.

Ефективний ККД η_e в залежності від типу енергетичної установки може мати значення в діапазоні 0,28–0,40. Нижні значення характерні для паротурбінних установок без проміжного перегріву пари, верхні – для малообертових газорідинних двигунів внутрішнього згоряння.

Нижча теплота згоряння Q_H в залежності від місцезнаходження добутку газу може знаходитись в значних межах, тобто Q_H може мати значення від 20800 кДж/м³ до 37200 кДж/м³.

Частка тепла, що вноситься рідким паливом q , може змінюватись від мінімального значення 0,05 до 0,30 і вище для ДВЗ, і від 0,10 до 0,70–0,80 для ПТУ.

Так, як в формулу (7) входить багато величин з досить широкими межами зміни їх значень та для спрощення розрахунків, побудуємо номограму.

Для спрощення побудови номограми (рис. 1) формула (7) розчленована з введенням певних проміжних параметрів. Так, через A позначена частина формули, що містить частку тепла q :

$$Ne = \frac{0,975q + 0,71}{1 - q} = \frac{\beta}{1 - q}$$

Залежність цього параметра від q показана в правому верхньому кутку номограми. При цьому для турбінних установок (ТУ) коефіцієнт зменшення потужності β приймався рівним 1 у всьому діапазоні зміни q (штрихова лінія), в той же час для дизельних установок (ДУ) в діапазоні

від 0,05 до 0,30 коефіцієнт β визначався за формулою (6), а при $q \geq 0,30$ він також приймався рівний 1 (на малюнку суцільна лінія).

У лівому верхньому квадраті показано залежність допоміжного параметра B та A :

$$B = P_w \cdot A$$

Значення P_w приймалось рівним 25000, 75000 та 1250000 м³.

У лівому середньому квадраті приводиться залежність:

$$C = \eta_e \cdot B$$

для двох крайніх значень $\eta_e = 0,30$ та $0,40$, в правому середньому квадраті залежність:

$$D = \alpha \cdot C$$

для значень $\alpha = 0,001; 0,002; 0,003$.

У правому нижньому квадраті показано залежність ефективної потужності головного двигуна Ne від нижчої теплоти згоряння газу:

$$Ne = 0,00725 Q_n D \quad (8)$$

При цьому параметр Q_n приймався рівним 21000 кДж/м³ (для природного газу із значним вмістом азота), 29400 кДж/м³ (для газу з помірним вмістом азота) та 37600 кДж/м³ (для газу із збільшеним включенням важких вуглеводнів).

Не важко помітити, якщо підставивши значення E , C , B , A в формулу (8), то отримаємо вихідну формулу (7) для визначення Ne .

У лівому нижньому квадраті показані залежності потужності Ne від експлуатаційної швидкості V_s для трьох параметричних значень P_w .

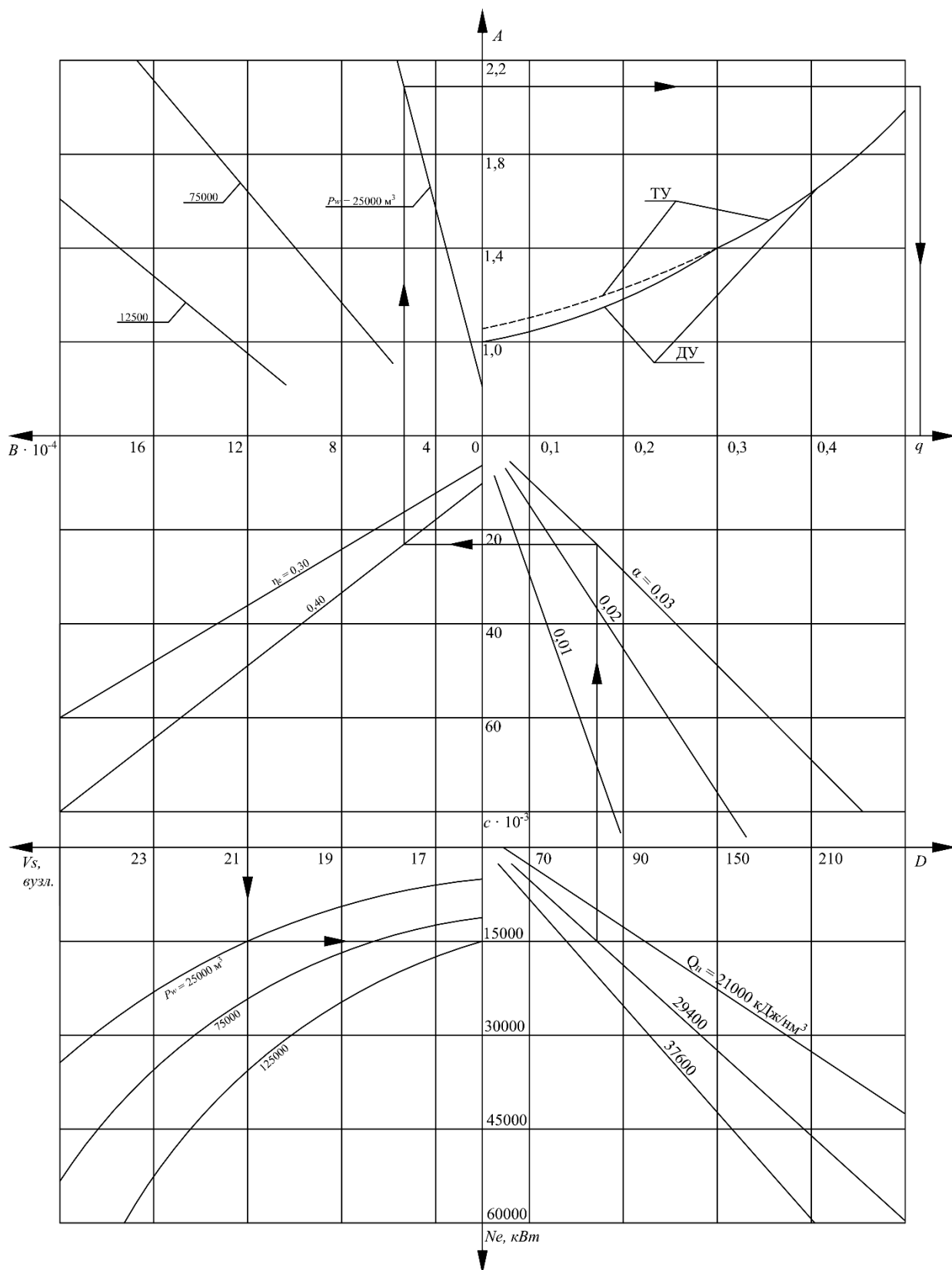


Рисунок 1 – Номограма для визначення ефективної потужності головних двигунів N_e в залежності від q , P_w , η_e , α , Q_h та $g_{e\Gamma}$

Які приклад користування номограмою, розглянемо судно-метановоз «Венатор» $P_w = 26000 \text{ м}^3$ зі швидкістю ходу 21 вузол. В якості головного двигуна встановлений RNMD-90 фірми «Зульцер» потужністю 15000 кВт. Визначимо по номограмі, яка частка тепла рідкого палива q необхідна для отримання вказаної потужності при умові, що добова випаровуваність газу α рівна верхній межі значення 0,003 та транспортується газ з помірним у своєму складі азотом, тобто Q_n приймаємо рівним 29400 кДж/м^3 . З номограми (вказано стрілкою) бачимо, що частка тепла що вноситься рідким паливом має бути рівною 0,52. Це відповідає даним, отриманим при експлуатації даного судна, підтверджуючи адекватність даних для побудови номограми.

В номограмі можна розв'язати обернену задачу – визначити потужність, яка може бути отримана при заданому значенні q .

Висновок. Номограма для визначення ефективної потужності головних двигунів – це графічний спосіб швидко оцінити ефективну потужність головних двигунів Ne в залежності від q , P_w , η_e , α , Q_n та g_{ef} . Такий підхід апроксимує багатомірну залежність в двомірне поле, де лінії та криві виконують роль алгебраїчних операцій.

Номограма — практичний і зручний інструмент для експлуатації та навчання, що дає змогу вирішувати як прямі, так і зворотні задачі ($Ne \leftrightarrow q$).

Потужність головних двигунів LNG-танкерів визначається розрахунком, спрямованим на забезпечення проєктної швидкості з урахуванням опору корпусу, утворення BOG та екологічних нормативів.

Практична апробація: приклад із двигуном RNMD-90 і отриманою долею $q \approx 0,52$ (для 15 МВт на судні «Venator») демонструє застосовність підходу до реального судна.

Методика продемонструвала практичну придатність, однак потребує адаптації до сучасних двотактних двопаливних двигунів (ME-GI, X-DF) та врахування сучасних підходів до управління boil-off gas (BOG) [5].

Література:

- [1]. Дьяченко Т.В. Транспортування та збереження зрідженого природного газу: навчальний посібник. – Одеса: Освіта України, 2017. – 106 с.
- [2]. Martins M., Teixeira A. Propulsive power prediction for large LNG carriers considering hull resistance and propeller efficiency. *Ocean Engineering*. 2018; 156 : 331–343.
- [3]. Shin Y., Seo K. Voyage-based power requirement mapping for LNG carriers under sea state variability. *Marine Structures*. 2020; 73 : 102809.
- [4]. Guo L., Li D., Chen Z. Data-driven calibration of propulsion power curves for LNG carriers using full-scale measurements. *Journal of Marine Science and Technology*. 2021;26(4):1285–1299.
- [5]. Yao H., Wang X., Li Q., et al. Performance analysis of ME-GI dual-fuel low-speed engines under variable boil-off gas supply on LNG carriers. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(11):889.

DETERMINATION OF THE POWER OF MAIN ENGINES OF LNG CARRIERS

Nalyvaiko V., Ph.D., Professor
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
Avdiunin R.
Lecturer at the Department of Marine Engineering and Power Engineering
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of
Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
Boitsov O.,

Student of Higher Education at the Department of Marine Engineering and Power Engineering,
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The study presents a computational methodology for assessing the power output of LNG carrier main engines, considering the variable formation of BOG and operational conditions. Analytical formulas and a nomogram are proposed to enable rapid estimation of the required engine power based on key parameters, including cargo capacity, average daily boil-off rate, gas composition, pilot fuel fraction, and overall plant efficiency. The paper further examines the advantages and limitations of graphical methods in comparison with digital modeling approaches, highlighting their clarity and speed for preliminary assessments, while emphasizing the necessity of calibration and adaptation to modern two-stroke dual-fuel engines.

Keywords: LNG, BOG, BOR

УДК 656.5.03:62-8

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ТА БАЛКЕРІВ

А. А. Сарабун, студ. гр. 4211¹, *Р. В. Петрик*, студ. гр. 4217^{ст2}

Л. К. Купінець, студ. гр. 3211³, *О. А. Шеремет*, студ. гр. 2211⁴

**під керівництвом канд. техн. наук, доцента каф. ЕСЕУ та ТЕ Кузнецової С. А.*

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹ocelotnik@gmail.com, ²hamuguya@gmail.com, ³levkuperin@gmail.com,

⁴leopro46@gmail.com

Анотація. Морські перевезення відіграють важливу роль у забезпеченні стабільності світової торгівлі. Значну частину цих перевезень забезпечують контейнеровози та балкери. Представлено аналіз складу сучасних суднових енергетичних установок цих типів суден. Показано, що завдяки використанню вискооефективних головних двигунів з ККД 53...54 % перспективним напрямком підвищення ефективності є вдосконалення пропульсивного комплексу двигун–гвинт–кермо–корпус. Запропоновано використання технічних рішень Wärtsilä EnergoFlow та EnergoProFin. Отримані показники ефективності суднової енергетичної установки при використанні запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: суднова енергетична установка, ефективність, контейнеровоз, балкер, показники.

Вступ. Відомо, що морські перевезення є одними з найбільш економічно вигідних світових логістичних ланцюжків. Важливу роль у цьому ланцюжку відіграють контейнеровози і балкери. Згідно даних [1] портфель заказів на нові судна на 2022...2024 роки склав: балкери – близько 35 %, нафтові танкери – близько 22 %, контейнеровози – близько 18 %, судна-газовози – 13 %. Незважаючи на очікуємий профіцит контейнерних перевезень у 2025–2026 роках, об'єм заказів на будівництво контейнеровозів дозволяє перекрити дефайт суден, що виводяться з експлуатації. Що стосується балкерів, то тільки за перше півріччя 2025 року введено у дію 238 суден, що збільшило дефайт флоту на 15,2 млн. т з урахуванням виведення їх з експлуатації. Крім того, цим двом типам суден – контейнеровозам і балкерам – притаманно збільшення дефайту для зменшення вартості доставки [1–4].

Згідно даних [5], склад найбільш сучасних, економічних та екологічних енергетичних установок в залежності від дефайту (D_w) можна представити наступним чином: для балкерів D_w до 10 тис. т може застосовуватися двовальні дизельні установки з середньообертовими двигунами (СОД) з редуктором та гвинтом фіксованого кроку (ГФК), електрична енергія виробляється 3-ма дизель-генераторами (ДГ) з високообертовими двигунами (ВОД) та 1-м допоміжним котлом (ДК); для балкерів D_w до 30 тис. т може бути використана двовальна пропульсивна установка з двома електродвигунами та Азіподом, що використовують енергію від 3-х ДГ з СОД та 1-м ДК, але найчастіше ці установки є одновальними з малообертовими двигунами (МОД), що працюють на гвинти фіксованого кроку (ГФК), 3-ма ДГ з СОД або ВОД, 1 комбінованим котлом (КК) для дефайту до 30 тис. т на вище. Установки контейнерних суден значно відрізняються по використанню електричної енергії, що пов'язано з наявністю рефрижераторних установок або контейнерів з цими установками та їх кількістю. Склад установки цих суден наступний: одновальна дизельна установка з МОД, що працює на ГФК або гвинт регульованого кроку; 3-6 ДГ, котельна установка може складатись з 1 ДК або комбінованого котла (КК), іноді зустрічаються ДК та утилізаційний котел (УК). Для забезпечення екологічних вимог для суден введених у дію з 2020 року головні та допоміжні двигуни обладнуються скруберами при використанні важких палив з сіркою, або використовують двопаливні двигуни та котли (ДФ) з використанням газоподібного палива з низьким вмістом сірки. Для зниження оксидів азоту застосовуються двигуни Tier III або встановлюються селективно-каталітичні реактори. Основна мета нововведень є поліпшення екологічних характеристик енергетичних установок з можливим зниженням витрат пального.

Метою роботи є аналіз складових показників ефективності установки для розробки рекомендацій з урахуванням особливостей судна та його енергетичної установки на прикладі контейнеровозу HMM OSLO та балкеру HL ECO.

Для визначення ефективності під час ходового режиму, як найбільшого за часом існуючих суднових енергетичних установок (СЕУ), використовуються коефіцієнт корисної дії та використання теплоти [6]:

$$(\eta^{\text{СЕУ}})_{\text{ХР}} = \frac{N_R + nP_{\text{ег}}^{\text{ДГ}}}{Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + nQ_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ДК}}} \quad \text{та} \quad (\eta^{\text{СЕУ}})_{\text{ХР}} = \frac{N_R + Q_s^{\text{ОУ}} + nP_{\text{ег}}^{\text{ДГ}} + Q_s^{\text{ДК}}}{Q_{\text{пал}}^{\text{ГД}} + nQ_{\text{пал}}^{\text{ДГ}} + Q_{\text{пал}}^{\text{ДК}}}$$

До складу СЕУ контейнеровозу НММ OSLO входять: ГД – MAN B&W 11G95ME-C10.5 потужністю $N_e^{\text{ГД}} = 75570$ кВт та питомою витратою пального $g_e^{\text{ГД}} = 0,162$ кг/(кВт·год) [5, 7].

Потужність під час переходу $N_{\text{ек}}^{\text{ГД}} = 59600$ кВт, що склало 0,79 від номінальної потужності при $g_{\text{ек}}^{\text{ГД}} = 0,158$ кг/(кВт·год), що передається на гвинт фіксованого кроку діаметром 10,4 м; 5ДГ з 3-ма електрогенераторами HSI9 913-10P з експлуатаційною потужністю $P_e 3 \times 5375$ kVA = $5375 \cdot 0,8 = 4300$ кВт при 720 хв^{-1} та 2-ма електрогенераторами HSI9 803-10P з експлуатаційною потужністю $P_e 3 \times 3500$ kVA = $3500 \cdot 0,8 = 2800$ кВт при 720 хв^{-1} ; в якості двигунів використовуються NiMSEN Diesel Engine 9H32/40 та 6H32/40 відповідно [5, 8] з потужністю двигунів $N_e^{\text{ДД1}} = 4500$ кВт та питомою витратою пального $g_e^{\text{ДД}} = 0,179$ кг/(кВт·год) для 9 циліндрового двигуна та $N_e^{\text{ДД2}} = 3000$ кВт та той же питомою витратою для 6-циліндрового. Допоміжний котел виробляє 5 т/год насиченої пари тиском 0,8 МПа. Для усіх цих елементів використовується рідке пальне: HFO, MGO [5, 7, 8].

До складу СЕУ балкеру HL ECO входять: ГД – WiN GD W6X72 DF номінальної потужністю у точці R₁ $N_e^{\text{ГД}} = 19350$ кВт та питомою витратою $g_e^{\text{ГД}} = 0,1377$ кг/(кВт·год) газоподібного палива та $g_e^{\text{ГД}} = 0,0008$ кг/(кВт·год) пілотного рідкого палива, теплова потужність при використанні двокомпонентної суміші палив $Q_t = 6918$ кДж/кВт·год. Експлуатаційна потужність $N_{\text{ек}}^{\text{ГД}} = 16180$ кВт при $76,5 \text{ хв}^{-1}$ що майже співпадає з R₂ з $g_e^{\text{ГД}} = 0,1327$ кг/(кВт·год) газоподібного палива та $g_e^{\text{ГД}} = 0,001$ кг/(кВт·год) пілотного рідкого палива, теплова потужність при використанні газоподібного пального $Q_t = 6667$ кДж/кВт·год. [5, 9]. Потужність від ГД передається на гвинт фіксованого кроку діаметром 8,8 м. 3ДГ з двигунами 5H22C DF NiMSEN $N_e^{\text{ДД}} = 1075$ кВт та теплова потужність при використанні двокомпонентної суміші палив $Q_t = 8301$ кДж/кВт·год, а питомою витратою аналога - дизельного пального $g_e^{\text{ГД}} = 0,1975$ кг/(кВт·год) при частоті обертання 900 хв^{-1} [5, 10]. Допоміжний котел виробляє 4т/год насиченої пари тиском 0,8 МПа [5].

З урахуванням використання опріснювальних установок вакуумного утилізаційного типу з використанням теплоти прісної охолоджувальної води від ГД для забезпечення потреб екіпажу,

установки та судна продуктивність їх складе для контейнеровозу 14...15, а балкеру 12...13 т/добу, обираємо середні значення 14,5 та 12,5 т/добу. Враховуючи ККД основних елементів визначаємо коефіцієнти ефективності для СЕУ на ходовому режимі при працюючих для контейнеру 1 ГД–валопровід–гвинт, 2 ДГ з потужністю двигунів $N_e^{ДД1} = 4500$ кВт для забезпечення живлення усіх користувачів у тому числі і рефрижераторних контейнерів, ДК та ОУ; а для балкеру склад працюючих елементів СЕУ той же, але потужності інші. Інша інформація отримана з описів елементів та рекомендаціям [6].

Для контейнеровозу

$$(\eta^{СЕУ})_{ХР} = \frac{N_R + nP_{ег}^{ДГ1}}{Q_{пал}^{ГД} + nQ_{пал}^{ДГ1} + Q_{пал}^{ДК}} = \frac{37965 + 2 \cdot 4300}{134894} = \frac{46565}{134894} = 0,345$$

$$(\eta^{СЕУ})_{КВТ} = \frac{N_R + Q_s^{ОУ} + nP_{ег}^{ДГ1} + Q_s^{ДК}}{Q_{пал}^{ГД} + nQ_{пал}^{ДГ1} + Q_{пал}^{ДК}} = \frac{37965 + 402,8 + 2 \cdot 4300 + 3437,5}{111694 + 2 \cdot 9554 + 4092} = \frac{50405,3}{134894} = 0,374$$

Для балкеру

$$(\eta^{СЕУ})_{ХР} = \frac{N_R + nP_{ег}^{ДГ1}}{Q_{пал}^{ГД} + nQ_{пал}^{ДГ1} + Q_{пал}^{ДК}} = \frac{10252 + 2 \cdot 1010}{38281} = \frac{12272}{38281} = 0,320$$

$$(\eta^{СЕУ})_{КВТ} = \frac{N_R + Q_s^{ОУ} + nP_{ег}^{ДГ1} + Q_s^{ДК}}{Q_{пал}^{ГД} + nQ_{пал}^{ДГ1} + Q_{пал}^{ДК}} = \frac{10252 + 347,2 + 2 \cdot 1010 + 2889}{29964 + 2 \cdot 2479 + 3359} = \frac{15781,2}{38281} = 0,412$$

$$Q_{пал}^{ГД} = N_e^{ГД} \cdot Q_T / 3600 = 16180 \cdot 6667 / 3600 = 29964 \text{ кВт}$$

$$Q_{пал}^{ДГ} = N_e^{ДГ} \cdot Q_T / 3600 = 1075 \cdot 8301 / 3600 = 2479 \text{ кВт}$$

Отримані значення показали можливість подальшого вдосконалення енергетичної установки, тому розробка рекомендацій з цього напрямку є *актуальною*.

Результати дослідження.

Аналіз складових показників ефективності показує що одним з найменших за значенням є саме пропульсивний комплекс для контейнеровозу та балкеру відповідно

$$\eta_e^{ПК} = \frac{N_R}{Q_{пал}^{ГД}} = \frac{37965}{111694} = 0,34 \quad \text{та} \quad \eta_e^{ПК} = \frac{N_R}{Q_{пал}^{ГД}} = \frac{10252}{29964} = 0,34 \quad ;$$

$$\eta_e^{СЕС} = \frac{P_e}{Q_{пал}^{ДГ}} = \frac{4300}{9554} = 0,45 \quad \text{та} \quad \eta_e^{СЕС} = \frac{P_e}{Q_{пал}^{ДГ}} = \frac{4300}{9554} = 0,45 \quad - \text{ для суднової}$$

$$\text{електростанції; } \eta_e^{ДК} = \frac{Q_s}{Q_{пал}^{ДК}} = \frac{3437,5}{4092} = 0,84 \quad \text{та} \quad \eta_e^{ДК} = \frac{Q_s}{Q_{пал}^{ДК}} = \frac{2889}{3359} = 0,86 \quad -$$

котельної установки. Значного впливу зміни пального з рідкого у контейнеровозі на газоподібне з рідким – у балкері не має, тому підвищення ефективності потребує саме комплекс гвинт- кермо-

корпус з урахуванням, що обидва ГД малооборотові та мають високий ККД 0,53 – 11G95ME-C10.5 та 0,54 – W6X72.

Тому пропонується застосувати розробки Wärtsilä EnergoFlow або EnergoProFin, що значно впливають і на індекс енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) [11–13]. Це дозволить підвищити паливну ефективність до 5 % при використанні EnergoProFin та до 10 % – EnergoFlow. Для цього у EnergoProFin використовується додаткова насадка з гідрокрилами на кінцівку гвинта. Елемент дозволяє зменшити втрати потоку обертання від гвинта завдяки перетворенню енергії обертання на тягу. Додатковий ефект полягає у зменшенні завихрення в маточині гвинта, вібрації, пульсації тиску та кавітації (рис. 1).

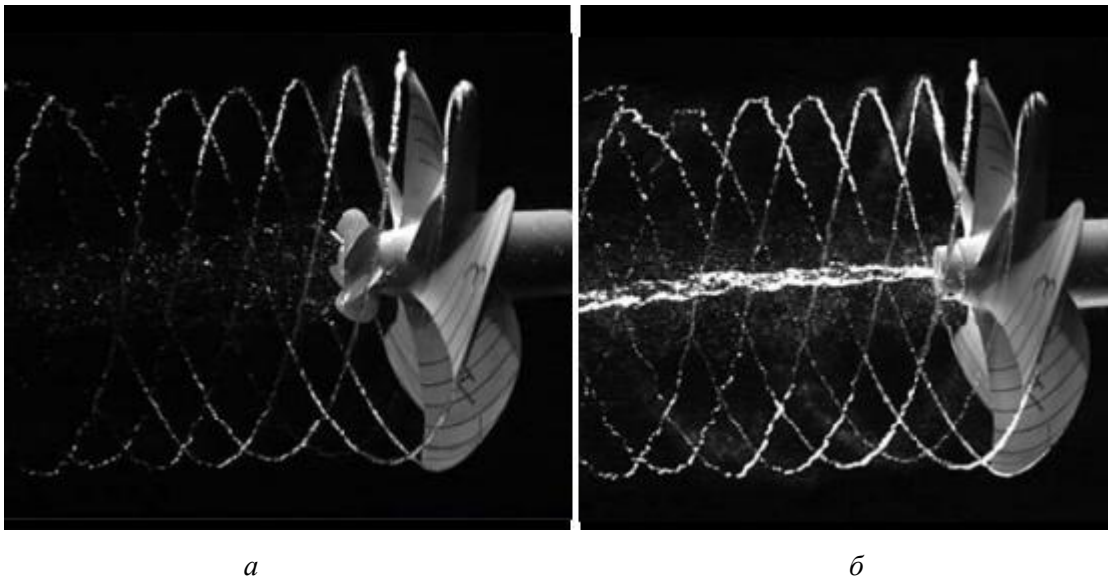


Рисунок 1. Модельні випробування EnergoProFin, що показують вихор маточини для гвинта фіксованого кроку: *а* – з насадкою; *б* – без неї

Wärtsilä EnergoFlow – представляє застосування інноваційного спрямовувача при забезпеченні завихрення для покращення ефективності рушійної сили за рахунок оптимізації припливу води до гвинта. Це здійснюється завдяки застосуванню кількох вигнутих ребер поєднаних між собою кільцем що закріплюється до корпусу судна. Ця конструкція спрямовує одну сторону кормового потоку в протилежному напрямку до напрямку обертання гвинта, створюючи попереднє завихрення (рис. 2).

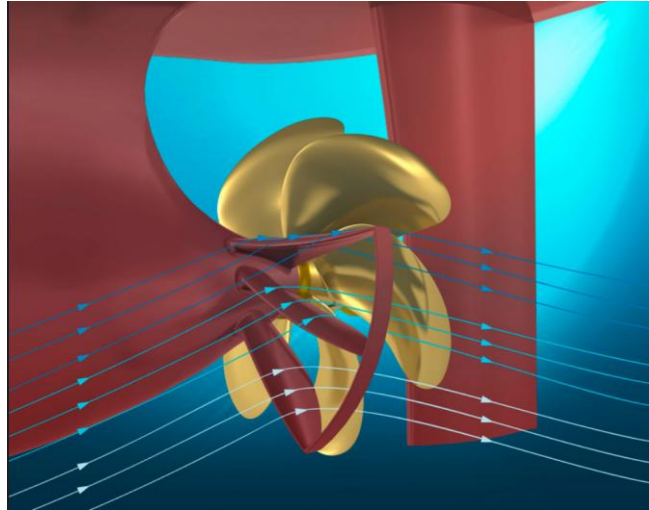


Рисунок 2. Модельні випробування EnergoFlow, що показують рух води вздовж конструкції

Тобто тільки з використанням EnergoProFin показники ефективності підвищуються до ККД – 0,364 та КВТ – 0,393 для контейнеровозу, а для балкеру складуть ККД – 0,336 та КВТ – 0,434. При використанні EnergoFlow вони будуть ще більше та складуть 0,386 – ККД та 0,415 – КВТ контейнеровозу, а для балкеру складуть 0,356 – ККД та КВТ – 0,458.

Висновки. 1. Для аналізу ефективності енергетичної установки використані коефіцієнти корисної дії та використання теплоти. Визначено, що найбільш впливовим на ходовому режимі є пропульсивний ККД тому обрано для розробки рекомендації підвищення ефективності саме його елемент–гвинт. 2. Для зменшення витрат на монтаж, поліпшення умов експлуатації запропоновано використання EnergoProFin та EnergoFlow, що використовують завихрення потоку води для підвищення рушійної сили. 3. За рахунок підвищення паливної ефективності на 5 % при використанні EnergoProFin для контейнеровозу ККД та КВТ збільшаться на 0,019, а при EnergoFlow при 10 % підвищення паливної ефективності ККД та КВТ на 0,041; для балкеру ці значення складають з EnergoProFin – ККД – 0,18, а КВТ на 0,021, при EnergoFlow – ККД – 0,036 на 0,046, а КВТ на 0,046, що пов'язано з потужним котлом на судні.

Література

- [1]. United Nations Conference on Trade and Development. “Executive Summary. Review of Maritime Transport.” 2024. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf (дата звернення: 10. 10.2025).
- [2]. Аналітики прогнозують кризу профіциту місткості світового контейнерного флоту з 2026 року URL: https://cfts.org.ua/news/2025/08/05/analitiki_prognozuyut_krizu_profitsitu_mistkosti_svitovogo_konteynernogo_flotu_z_2026_roku_83798 (дата звернення: 10.10.2025).
- [3]. Шевченко Є.В. , Стовба Т. А. Світовий ринок морських контейнерних перевезень: реалії та доміанти розвитку. Проблеми сучасних трансформацій. – 2024. – №14. – DOI: <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2024-14-02-01>
- [4]. Світовий балкерний флот за підсумками першої половини 2025 року збільшився на 210 суден URL: https://cfts.org.ua/news/2025/07/09/svitoviy_balkerniy_flot_za_pidsumkami_persho_polovini_2025_roku_zbilshivsya_na_210_suden_83493 (дата звернення: 10.10.2025).

- [5]. SIGNIFICANT SHIPS OF 2020, 2021 URL: www.rina.org.uk/sigships (дата звернення: 10.10.2025).
- [6]. Горбов В.М. Основи суднової енергетики: збірник практичних занять [Текст] / В.М.Горбов, І.П.Єсін, В.С.Мітенкова – Миколаїв: НУК, 2018. – 244с.
- [7]. Marine engine programme. MAN Energy Solution 2020 URL: <https://korindo-energy.com/wp-content/uploads/2020/05/MAN-Engine-Programme-Guide-Korindo-Energy.pdf> (дата звернення: 10.10.2025).
- [8]. HiMSEN Diesel Engine H32/40 URL: <https://www.hyundai-engine.com/en/products/detail/57> (дата звернення: 10.10.2025).
- [9]. WiN GD X72 DF URL: <https://wingd.com/products-solutions/engines/x72df-21> (дата звернення: 17.10.2025).
- [10]. HiMSEN Dual Fuel Engine H22CDF URL: <https://www.hyundai-engine.com/ko/products/detail/47> (дата звернення: 10.10.2025).
- [11] Жук, О.О. Альтернативні рішення покращення індексу енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та індикатору інтенсивності вуглецю (СІІ) на суднах торгівельного флоту [Текст] / О.О. Жук // Збірник наукових праць НУК. 2022. №2. С. 82–88.
- [12] Wärtsilä EnergoProFin URL: <https://www.wartsila.com/services-catalogue/propulsion-services/energoprofin> (дата звернення: 10.10.2025).
- [13] Wärtsilä Energoflow – increase energy efficiency and reduce emissions URL: <https://www.wartsila.com/services-catalogue/propulsion-services/energoflow> (дата звернення: 10.10.2025).

ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF POWER PLANTS OF CONTAINER SHIPS AND BULK CARRIERS

Sarabun Andrii, Petryk Roman, Kupinets Lev, Sheremet Aleksandr

Supervised by Ph.D. (Tech. Sci.), Associate Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants and Heat Power Engineering, S.A. Kuznetsova

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Abstract. Maritime transportation plays an important role in ensuring the stability of global trade. A significant share of these shipments is carried out by container ships and bulk carriers. The paper presents an analysis of the composition of modern ship power plants for these types of vessels. It is shown that due to the use of highly efficient main engines with an efficiency of 53–54%, a promising direction for improving overall performance is the optimization of the propulsion complex comprising the engine–propeller–rudder–hull system. The use of Wärtsilä EnergoFlow and EnergoProFin technical solutions is proposed. The obtained performance indicators of the ship power plant with the implementation of the proposed technical solutions are presented.

Keywords: ship power plant, efficiency, container ship, bulk carrier, performance indicators

УДК 621.438:621.565

КОМБІНОВАНИЙ ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ЦИКЛ ДИЗЕЛЬ-ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ З ЕНЕРГОХОЛОДИЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

О. Г. Слинько, канд. техн. наук¹; А. С. Бойчук, канд. техн. наук²; С. В. Козловський, канд. техн. наук³.

*^{1,2,3}Одеський національний морський університет,
вул. Мечникова, 34, м. Одеса, Україна, 65029*

¹asg_37@ukr.net, ²boychart@i.ua, ³nemio777@gmail.com

Анотація. Дизель-газотурбінні установки є найбільш ефективними перетворювачами теплової енергії згоряння палива в механічну/електричну енергію. Тому вдосконалення їх термодинамічного циклу є актуальною задачею. Пропонується в якості свіжого заряду дизеля ДГТУ використовувати сухе холодне повітря, яке отримується при охолодженні і сушці зовнішнього повітря. Таке повітря отримується при конденсації прісної води із зовнішнього повітря за допомогою утилізаційної комбінованої тепловикористовуючої енергохолодильної установки, в якій в якості гарячого джерела теплоти використовувати відпрацювавши газів турбіни ДГТУ. При цьому розширення газів в турбіні здійснюється до температури, придатної для їх використання в якості гарячого джерела енергохолодильної установки.

Ключові слова: дизель-газотурбіна установка, утилізаційна комбінована тепловикористовуюча енергохолодильна установка, охолоджений свіжий заряд ДВЗ, розширення газів в турбіні до тиску нижче атмосферного.

Вступна частина. Дизель-газотурбінні установки (ДГТУ) є перспективними перетворювачами теплової енергії згоряння палива в механічну/електричну енергію. Тому вдосконалення їх термодинамічного циклу (фундаменту їх ефективності) є актуальною задачею. В підручнику [1, с. 83] сформульовано золоте правило термодинаміки, відповідно якому: *«для підвищення ефективності процесу перетворення теплоти в механічну енергію, робоче тіло перед стисненням охолоджуй, і розширюй до температури його фізичної придатності при використанні»*. Це правило неодноразово підтверджувалось в наших дослідженнях. Так, в монографії [2] виконано вдосконалення дизельних, газотурбінних і паротурбінних енергетичних установок, в яких використовувалось це правило. Охолоджувати їх робочі тіла пропонувалось за допомогою утилізаційної тепловикористовуючої абсорбційної холодильної установки.

Останнім часом нами запропоновано і досліджено комбінований термодинамічний цикл утилізаційної тепловикористовуючої комбінованої енергохолодильної установки (УТВКЕХУ), яка працює на вторинній теплоті середнього і високого температурного потенціалу [3]. В останніх наших роботах [4] досліджене питання отримання прісної води із оточуючого повітря за допомогою таких установок. В роботі [4] досліджено питання отримання прісної води за рахунок теплоти рідини, що охолоджує ДВЗ, а в дослідженні виконаного авторами – за рахунок теплоти відпрацювавших газів. Ці дослідження виконано для карбюраторних і дизельних двигунів потужністю 100 кВт.

Розрахунки виконано для дванадцяти випадково обраних міст світу. Результати дослідження для дизельних ДВЗ показали, що при використанні теплоти відпрацювавших газів дизельного ДВЗ потужністю 100 кВт в якості гарячого джерела УТВКЕХУ можна отримувати у досліджених містах світу, в середньому, сухе ($d \leq 5$ г вол./кг с.п.) і охолоджене в діапазоні температур 2,8...4,4 °С повітря в кількості від 0,5013 до 0,8521 м³/с або від 0,6375 до 1,089 кг/с.

При цьому, крім холодного повітря, отримується від 14,4 до 31,4 літрів прісної води на годину, охолодженої в указаних межах температур.

В цій же роботі досліджується питання заміни базової ДГТУ, термодинамічний цикл якої побудовано на базі ДВЗ, з характеристиками – $\epsilon=15$, $\lambda=1,4$ і $\rho=1,4$, та з розширенням газів в турбіні до атмосферного тиску, працюючої при температурі зовнішнього повітря 35 °С, ДГТУ в циліндри ДВЗ якої подається охолоджене в УТВКЕХУ повітря, а відпрацювавши гази ДВЗ подаються на лопатки турбіни, де вони розширюються до температури 110 °С, придатної для їх використання в якості гарячого джерела теплоти в УТВКЕХУ. Кінцеве охолодження газів (після їх використаних в якості гарячого джерела в УТВКЕХУ) здійснюється у її випарнику, де здійснюється також охолодження і сушка зовнішнього повітря з метою отримання прісної води.

Ціль роботи – вдосконалення термодинамічного циклу дизель-газотурбінних установок.

Основна частина.

На рис. 1 зображено принципову схему ДГТУ, в циліндри ДВЗ **VII** якої із ресивера **VIII** по трубопроводу **6** подається охолоджене в УТВКЕХУ зовнішнє повітря. Відпрацювавши в ДВЗ гази подаються в турбіну **V**, до якої справа муфтою **B** приєднано її електрогенератор **VI**, а зліва муфтою **A** – вал УТВКЕХУ, на якому знаходяться енергетична парова турбіна, живильний насос ПТУ, компресор холодильної установки УТВКЕХУ. Вся ця сукупність (парової турбіни, компресора і живильного насоса) може працювати в двох режимах: в першому режимі, коли потужність парової турбіни більше сумарної споживаємої потужності живильного насосу і компресора, тоді муфта **A** включається і надлишок механічної енергії передається електрогенератору **V**, в другому режимі – коли потужність парової турбіни менше – газова турбіна ДГТУ компенсує недостачу механічної енергії для роботи УТВКЕХУ.

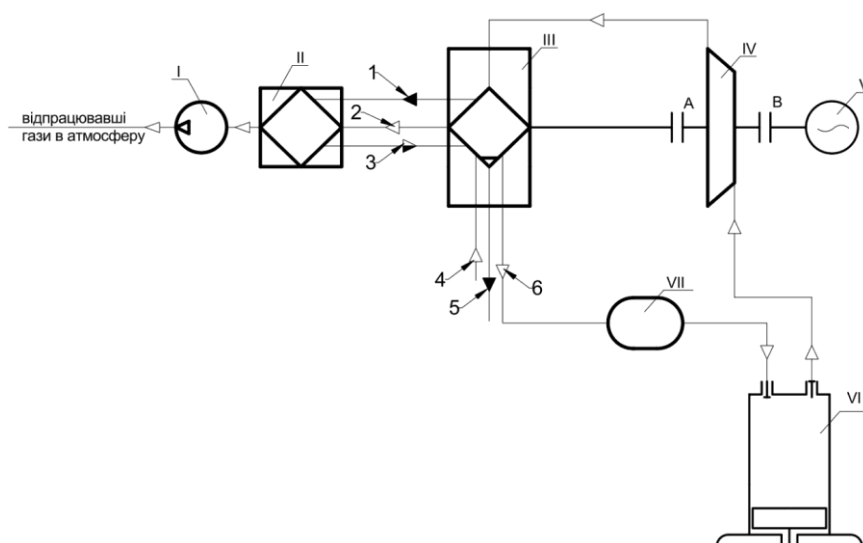


Рисунок 1 – Принципова схема пропонуємої комбінованої ДГТУ з УТВКЕХУ

Щойно відпрацювавши в турбіні газу використовуються в якості гарячого джерела теплоти в УТВКЕХУ *III* для отримання енергетичної пари, яка використовується в паровій турбіні, механічна енергія якої використовується для приводу компресора холодильної установки і живильного насосу паротурбінної установки.

Головне призначення УТВКЕХУ, як наголошено вище, це отримання прісної води із зовнішнього повітря, яке подається по трубопроводу *4* у випарник холодильної машини УТВКЕХУ. Отримуваний конденсат (холодна прісна вода) подається в збірник прісної води (на схемі не показано). Холодоносії, охолоджуємі у випарнику холодильної машини УТВКЕХУ, циркулює по трубопроводу *1-3* через теплообмінник *II*, де остаточно охолоджуються газу, що використані в якості гарячого джерела УТВКЕХУ. Охолоджені газу, які розширилися в турбіні нижче атмосферного тиску, стискаються і викидаються в атмосферу вакуумним насосом *I*.

На рис. 2 в діаграмах p, v і T, s наводяться сумісно термодинамічні цикли базової і пропонуємої ДГТУ. ДВЗ пропонуємої установки всмоктує сухе холодне повітря (точка $1'$), а газу в турбіні розширюються до тиску нижче атмосферного (процес $6'-7'$).

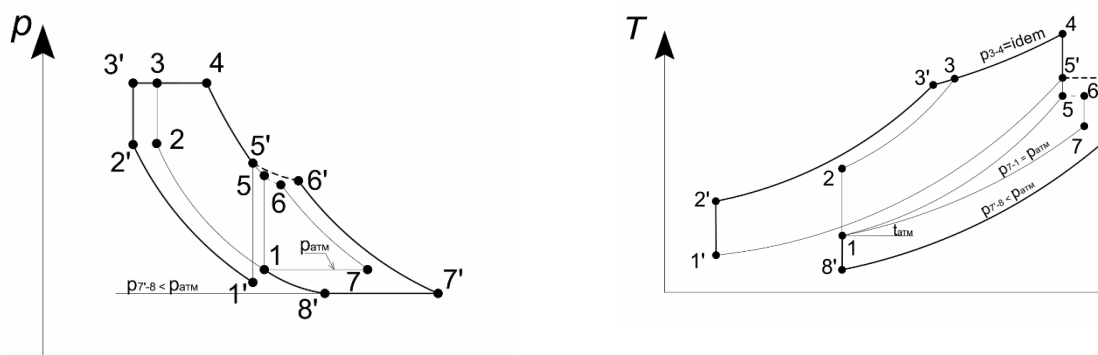


Рисунок 2 – Сумісне зображення в p, v і T, s координатах термодинамічних циклів базової (1-2-3-4-5-6-7-1) та пропонуємої (1'-2'-3'-4-5'-6'-7'-8'-1) ДГТУ

Використовуючи відомі співвідношення між термічними параметрами робочого тіла в характерних точках звичайних класичних ДГТУ і значення вхідних даних ДВЗ, які наведені вище, розраховано термічні параметри для базової і модифікованої ДГТУ, які наводяться в табл. 1 і табл. 2.

Таблиця 1. Термічні параметри робочого тіла базової ДГТУ (1-2-3-4-5-6-7-1)					Таблиця 2. Термічні параметри робочого тіла удосконаленої ДГТУ (1-2-3-4-5-6-7-1)				
	p , МПа	v , м ³ /кг	T , К	t , °С		p , МПа	v , м ³ /кг	T , К	t , °С
1	0,101300	0,873130	308,15	35,0000	1'	0,10132	0,782460	276,15	3,0000
2	4,490000	0,058209	910,33	637,180	2'	4,49000	0,052164	815,80	542,65
3	5,388000	0,058209	1092,4	819,250	3'	5,38800	0,052164	978,96	705,81
4	5,388000	0,081492	1529,4	1256,24	4	5,38800	0,081492	1529,4	1256,2
5	0,194700	0,873130	592,27	319,120	5'	0,22706	0,782460	618,83	345,68
6	0,192250	0,884480	592,27	319,120	6'	0,22456	0,791170	618,83	345,68
7	0,101325	1,397600	493,23	220,080	7'	0,04194	2,622800	383,15	110,00

1	0,101300	0,873130	308,15	35,0000	8'	0,04194	1,639500	239,50	-33,65
					1	0,10130	0,873130	308,15	35,00

Зрівнюючи дані табл. 1 і 2, можна однозначно стверджувати, що використання сухого холодного повітря, в якості свіжого заряду ДВЗ, при збереженні теплової напруженості ДВЗ, підвищує енергоспроможність його відпрацювавших газів (підвищуються значення тиску до 0,22456 МПа проти 0,19225 МПа і температури до 618,83 °С проти 592,27 °С). В пропонуємій ДГТУ це обумовлює перерозподіл використання потужності газів, що утворюються в циліндрах ДВЗ, на користь турбіни. Розширення газів в турбіні до тиску нижче атмосферного, що має місце в пропонуємій ДГТУ, також сприяє підвищенню її потужності. В пропонуємій ДГТУ в турбіні газів розширюються до температури 110 °С (до тиску 0,04194 МПа), щоб забезпечити їх теплопридатність для використання в якості гарячого джерела теплоти в УТВКЕХУ, використовуємої для отримання прісної води із оточуючого повітря.

Пропонуємо удосконалення термодинамічного циклу ДГТУ, як вказано вище, полягає в тому, що в циліндри ДВЗ подається сухе охолоджене повітря, що отримується в УТВКЕХУ, яка використовується для отримання прісної води із оточуючого повітря за рахунок теплоти відпрацювавших в турбіні газів, та розширення газів в турбіні здійснюється до тиску нижче атмосферного.

Середній статистичний об'єм сухого холодного повітря, отримуваний в одиницю часу в дванадцяти випадково обраних містах світу, при використанні УТВКЕХУ для отримання прісної води із оточуючого повітря, яка працює на теплоті відпрацювавших газів дизеля потужністю 100 кВт, дорівнює

$$V = \frac{mRT}{p} = \frac{1,00671 \cdot 287,1 \cdot 276,75}{1,01325 \cdot 10^5} = 0,7894 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

де середню статистичну масу отримуюмого охолодженого повітря для дванадцяти обраних міст світу визначено за даними табл. 1 в роботі [5], а його температуру прийнято середню в діапазоні температур 2,8...4,4 °С.

Секундний об'єм свіжого повітря, який необхідний для роботи *дизельного* ДВЗ потужністю 100 кВт, розрахований за методом Гринивецького-Мазінга, дорівнює $V_{\text{пов}} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с}$.

Тобто, при використанні УТВКЕХУ для отримання прісної води, отримується не тільки прісна вода (в середньому 25,58 кг/год), але й сухе ($d < 5 \text{ г вол./кг с.п.}$) холодне ($t < 5 \text{ °С}$) повітря, об'ємна продуктивність якого в середньому дорівнює $V = 0,7894 \text{ м}^3/\text{с}$, що значно більше необхідної теоретичної витрати свіжого повітря ($0,18 \text{ м}^3/\text{с}$) для роботи ДВЗ потужністю 100 кВт.

Отже, пропонуємо удосконалення термодинамічного циклу ДГТУ здійснюється наступним чином: в циліндри ДВЗ потужністю 100 кВт подається сухе холодне повітря в кількості $0,36 \text{ м}^3/\text{с}$, а решта $0,4294 \text{ м}^3/\text{с}$ змішується з зовнішнім повітрям в пропорції, яка необхідна для отримання температури суміші, необхідної для подальшого її використання для

охолодження швидкопсуючих вантажів або кондиціонування повітря, в устрої, в якому використовується пропонуєма ДГТУ.

В модифікованій ДГТУ відпрацювавши газів ДВЗ подаються на лопатки газової турбіни, де вони розширюються до температури 110 °С. Після чого щойно відпрацювавши в турбіні газів використовуються в якості гарячого джерела теплоти в УТВКЕХУ. Остаточне охолодження газів, використаних в якості гарячого джерела в УТВКЕХУ, здійснюється у теплообміннику, через який циркулює холодоносій, охолоджуємий у випарнику УТВКЕХУ. Указане значення кінцевої температури розширення газів в турбіні обумовлюється сучасною температурною дієздатністю відомих зараз холодоагентів, використовуваних в холодильній техніці.

Використовуючи відомі співвідношення між термічними параметрами робочого тіла в характерних процесах термодинамічного циклу класичної ДГТУ і його калорійними властивостями, розраховано термодинамічні характеристики ефективності: питомі роботи стиснення і розширення, питомі теплоти, що підводяться і відводяться в процесах циклів, та їх сумарні значення. Використовуючи сумарні значення теплоти, що підводяться в циклах, і отримуваних робіт, розраховано значення термічних ККД циклів ДГТУ та ступені їх удосконалення.

Висновки.

Для можливості порівняння отриманих характеристик ефективності зрівнюємих термодинамічних циклів ДГТУ, їх значення наводяться в табл. 3.

Таблиця 3. Зіставлення показників ефективності термодинамічних циклів базової і удосконаленої ДГТУ

Показники ефективності	Термодинамічний цикл ДГТУ	
	базова	удосконалена
Питома робота стиснення в процесі 1-2, кДж/кг	-432,21	-387,33
Питома робота розширення в процесі 3-4, кДж/кг	125,45	158,02
Питома робота розширення в процесі 4-5, кДж/кг	672,59	653,53
Питома робота ДВЗ, кДж/кг	365,83	424,22
Питома робота утилізаційної турбіни, кДж/кг	71,080	119,89
Питома робота ДГТУ, кДж/кг	436,91	544,11
Питома теплота, що підводиться в ізохорному процесі 2-3, кДж/кг	130,68	117,11
Питома теплота, що підводиться в ізобарному процесі 3-4, кДж/кг	439,08	553,02
Сумарна теплота, що підводиться в циклі, кДж/кг	569,76	670,18
Питома теплота, що відводиться в циклі, кДж/кг	-203,93	-245,96
Термічний ККД ДВЗ	0,6421	0,6330
Термічний ККД циклу Карно на базі циклу ДВЗ	0,7985	0,8194
Ступінь досконалості циклу ДВЗ	0,8041	0,7725
Термічний ККД ДГТУ	0,7668	0,8118
Ступінь досконалості циклу ДГТУ	0,9603	0,9908

Аналізуючи табличні данні, можна однозначно стверджувати що при сталості температурно-тискової напруженості ДВЗ в обох модифікаціях ДГТУ і при зниженні температури свіжого заряду, що подається в циліндри ДВЗ, термодинамічний цикл ДВЗ вдосконаленої ДГТУ зміщується в бік дизеля: зменшується кількість теплоти, що підводиться в ізохорному процесі, і збільшується – в ізобарному (збільшується ККД відповідного граничного циклу Карно). До того ж, при цьому збільшуються:

- кількість теплоти, що підводиться в циклі ДВЗ удосконаленої ДГТУ на 17,6 %;
- працездатність газів, що надходять на лопатки турбіни (див. термічні параметри газів в точці 6, табл. 1 і табл. 2);
- питома робота турбіни збільшується на 68,7 % (при розширенні газів в турбіні до температури, придатної для використання їх в якості гарячого джерела теплоти в УТВКЕХУ як складової пропонуємої ДГТУ);
- термічний ККД пропонуємої ДГТУ зростає на 5,9 %;
- ступінь досконалості досягає значення 99,1 %, тобто термодинамічний ККД пропонуємої ДГТУ наближається до ККД відповідного граничного циклу Карно.

Також, крім вказаних термодинамічних переваг циклу пропонуємої ДГТУ над базовою, вона має низку додаткових переваг:

- отримується прісна вода, що вкрай важливо зараз для засушливих районів Землі, яких в майбутньому буде тільки збільшуватися;
- можливість отримання додаткової кількості холодного повітря, яке можна використовувати для комфортного, технологічного або технічного кондиціонування, що вкрай важливо для окремих видів транспортних засобів і не тільки;
- ДГТУ, термодинамічні цикли яких модифіковані пропонуємим способом, вже зараз актуальні для всіх континентів світу, а попит на такі установки в майбутньому буде тільки зростати.

Проте, конструкція пропонуємих ДГТУ, обладнаних УТВКЕХУ, суттєво ускладнюється, але отримуємі при цьому прісна вода і холодне повітря, підвищення термічного ККД таких установок і можливість кондиціонування транспортних засобів цього варті.

До того ж, виготовлення таких ДГТУ, це разові витрати, а підвищення їх термодинамічного ККД, отримання прісної води та можливість комфортного, технічного і технологічного кондиціонування устроїв, в яких використовуються такі установки, має місце протягом всього терміну їх використання.

Й саме головне, в пропонуємих ДГТУ майже відсутнє теплове забруднення атмосфери, що є вкрай важливою проблемою сучасності.

Література

1. Вассерман О.А., Слинько О.Г. (2019) Технічна термодинаміка і теплообмін. *Вид-во «Фенікс»*. Одеса. 494 с.

2. Вассерман О.А., Слинько О.Г., Шутенко М.А. (2020). Інноваційні цикли енергетичних установок. *Вид-во «Фенікс»*. Одеса. 18 с.
 3. Лавренченко Г.К., Слинько О.Г., Галкін В.М., Козловський С.В., Бойчук А.С. (2022). Утилізаційна комбінована енергохолодильна установка з повним регенеративним теплообміном. *Refrigeration Engineering and Technology*, 58(1), **50-61**.
 4. Г.К. Лавренченко, О.Г. Слинько, А.С. Бойчук, С.В. Козловський. (2025). Термодинамічний цикл устрою для отримання прісної води за рахунок теплоти рідини, що охолоджує ДВЗ. *Холодильна техніка та технологія*. № 61(1). С. 55–63.
-

UDC 621.438:621.565

**COMBINED THERMODYNAMIC CYCLE OF A DIESEL-GAS TURBINE PLANT
WITH AN ENERGY REFRIGERATION PLANT****O. G. Slynko**, PhD in engineering sciences¹; **A. S. Boychuk**, PhD in engineering sciences²;**S. V. Kozlovskiy**, PhD in engineering sciences³.^{1,2,3}Odesa National Maritime University,

34, Mechnikova str., Odesa, 65029, Ukraine

¹asq_37@ukr.net, ²boychart@i.ua, ³nemio777@gmail.com

Abstract. Diesel gas turbine units are the most efficient converters of thermal energy from fuel combustion into mechanical/electrical energy. Therefore, improving their thermodynamic cycle is an actual task. It is proposed to use dry cold air as a fresh charge for the diesel engine DGTU, which is obtained by cooling and drying the outside air, which is obtained by obtaining fresh water from the outside air using a combined heat and power energy cooling unit, in which the exhaust gases from the DGTU turbine are used as a hot heat source, and the expansion of the gases in the turbine is carried out to a temperature suitable for their use as a hot source for the energy-cooling unit.

Keywords: diesel gas turbine unit, combined heat and power recovery unit, cooled fresh charge of internal combustion engine, expansion of gases in the turbine to a pressure below atmospheric pressure.

УДК 620.178.5

ПРИЧИНИ ВИЯВЛЕННЯ ВІБРАЦІЇ ПОДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ**Свиридов В. І.,***канд. техн. наук, доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна**viacheslav.svyrydov@nuos.edu.ua***Моїсєнко Ю. І.,***магістрант гр. 5220зм,**Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна**iuriim80@gmail.com*

Анотація. У підшипниках ковзання з рідким мастилом сили тертя і створювана ними вібрація залежить від характеру руху потоку мастила, її в'язкості. Всі ці показники переважно визначається турбулентністю прикордонного шару мастила, коли пульсації тиску і пропорційний їм рівень випадкової вібрації залежать від квадрата швидкості потоку, рівної окружної швидкості обертання шийки ротора.

Ключові слова: устаткування, підшипники ковзання, мастило, сили тертя, вібрація, діагностика.

Підшипники ковзання поділяють на гідродинамічні, в яких несучий мастильний шар створюється за рахунок руху шийки валу щодо корпусу підшипника, і гідростатичні, коли зазначений шар створюється зовнішніми джерелами тиску. Гідростатичні підшипники, як правило, мають більшу товщину мастильного шару та меншу жорсткість у радіальному напрямку.

Більшість механізмів з підшипниками ковзання розвантажені від постійних осьових сил, однак, на осьовий підшипник або на завязі кільця радіального підшипника діють осьові змінні сили, що мають той самий порядок, що і радіальні. Ці сили визначаються, як правило, дефектами виготовлення та встановлення підшипника, при якому п'ята і корпус осьового підшипника або завязе кільце і корпус радіального підшипника мають перекося. В результаті перекося поверхня ковзання не збігається з площиною перпендикулярної осі обертання ротора, і точка контакту переміщається як по колу, так і в осьовому напрямку з частотою обертання ротора. Коливання виникають у тому випадку, якщо осьове розвантаження не буде повним і на підшипник з боку ротора діятиме постійна сила, що перевищує змінну. В осьових підшипниках можливе нерівномірне зношування вкладишів, а в сегментних підшипниках – неоднакова товщина вкладишів або неоднакова глибина установки сегментів. Зазначені причини можуть бути джерелом осьових сил і коливань ротора з частотами, кратними частоті його обертання $F_{об}$. Створювані коливання збуджуються кінематичні, і їхня амплітуда не залежить від частоти сил, що вимушують, а визначається мінімальною з величин кутових перекося п'яти або корпусу, або різницею товщин вкладишів сегментних підшипників. У багатьох типах механізмів сили тертя в підшипниках є причиною появи інтенсивної випадкової вібрації, що робить помітний внесок у загальний рівень вібрації механізму. Вібрація, створювана силами тертя у механізмах, на вирішення багатьох практичних завдань може бути представлена стаціонарним випадковим сигналом з нормальним законом розподілу. Кількісна оцінка випадкової вібрації полягає у визначенні залежності спектральної густини або рівня вібрації від параметрів підшипників та частоти.

У підшипниках ковзання з рідким мастилом сили тертя і створювана ними вібрація залежить від характеру руху потоку мастила, її в'язкості. При малих швидкостях потоку і сталості величини зазору вібрація переважно визначається турбулентністю прикордонного шару мастила, коли пульсації тиску і пропорційний їм рівень випадкової вібрації залежать від квадрата швидкості потоку, рівної окружної швидкості обертання шийки ротора. Частота максимуму спектральної щільності пульсацій тиску в мастилі також сильно залежить від швидкості потоку мастила, проте втрати при перетворенні пульсацій тиску у вібрацію вкладиша і корпусу підшипника, втрати на контактних поверхнях при поширенні вібрації до точок вимірювання приводять до того, що максимум спектральної щільності вібрації корпусу підшипника. У міру збільшення швидкості обертання валу зростають швидкості потоку мастила, і виникає турбулентність у всьому обсязі потоку в точках з великим перепадом швидкості руху мастила.

Цьому сприяє ексцентричність зазору в підшипнику, що викликається силами ротора і силами тертя. Крім того, використання зазорів складної конфігурації, наприклад, "лимонних" підшипниках, що забезпечують стійкість обертання ротора, додатково сприяє виникненню турбулентності в потоці мастила навіть на малих швидкостях обертання ротора. За наявності дефектів виготовлення або зносу шийки валу, що виявляються у вигляді її овальності або гранності, розбіжності осі обертання ротора з віссю шийки в кожній нерухомій відносно корпусу підшипника точці зазору швидкість потоку мастила буде залежати від кута повороту ротора. Періодична зміна швидкості потоку викликає відповідну зміну спектральної щільності пульсацій тиску у цій точці і, як наслідок, вібрації вкладиша та корпусу підшипника, тобто. призводить до випадкової вібрації підшипника ковзання. Аналіз модулюючих функцій дозволяє легко виявляти дефекти підшипників ковзання.

Аналіз впливу дефектів виготовлення і складання підшипників ковзання на вібрацію ротора і корпусу механізму розглянемо на підшипниках з нерухомим зовнішнім і внутрішнім кільцями, що обертається. До дефектів виготовлення таких підшипників слід віднести овальність та гранність доріжок кочення, різнорозмірність тіл кочення, відхилення їх форм від розрахункових, наприклад, овальність та гранність роликів, відхилення форми кульок від сферичної.

До дефектів складання підшипникового вузла та насосного обладнання в цілому слід віднести перекіс внутрішнього та зовнішнього кілець підшипника, поява радіального натягу в підшипнику, примусове центрування валів машини та механізмів при їх стикуванні, та перекіс сполучних муфт. Останні два фактори призводять до появи радіального навантаження, що обертається, на поверхні кочення (злам осі валів) або зміни величини статичного навантаження. Вплив дефектів виготовлення підшипників на вібрацію ротора горизонтального механізму при наявності тільки радіального навантаження на поверхні кочення, що створюється силою тяжіння ротора, призводить до появи складових вібрації на частотах, кратних $F_{об}$ при неспіввісності валу ротора і внутрішнього кільця підшипника, їх овальності.

Висновки. У багатьох типах механізмів сили тертя в підшипниках є причиною появи інтенсивної випадкової вібрації, що робить помітний внесок у загальний рівень вібрації механізму. Вібрація, створювана силами тертя у механізмах, на вирішення багатьох практичних завдань то, можливо представлена стаціонарним випадковим сигналом з нормальним законом розподілу. Кількісна оцінка випадкової вібрації залежить від спектральної щільності або рівня вібрації від параметрів підшипників та частоти.

Література

- [1]. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. № 1(62). С.50–60.
- [2]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.

[3]. Костишин В. С., Яремак І. І. Математична модель надійності та ефективності роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції Науковий вісник Національного гірничого університету. 2017. № 5(161). С. 62–68.

[4]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.

[5]. Яремак І. І., Костишин В. С., Костишин А. В. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. № 27(3). С.166–170. 13.

[6]. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.

REASONS FOR DETECTION OF VIBRATION IN SLIDING BEARINGS

Svyrydov Viacheslav

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Power Engineering,
Educational and Scientific Institute, National Shipbuilding University named after Admiral Makarov,
Mykolaiv, Ukraine

Moiseyenko Yuriy

Master's student, 5220m

Kherson Educational and Scientific Institute

Admiral Makarov National Shipbuilding University, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. *In plain bearings with liquid lubricant, the friction forces and the vibration they create depend on the nature of the lubricant flow movement and its viscosity. All these indicators are mainly determined by the turbulence of the boundary layer of the lubricant, when the pressure pulsations and the level of random vibration proportional to them depend on the square of the flow velocity, equal to the circumferential speed of rotation of the rotor neck.*

Keywords. Equipment, bearing units, vibration indicators, vibration forces, diagnostics

УДК 621.4:620.9

ВИКОРИСТАННЯ WAPS В ПРОПУЛЬСИВНОМУ КОМПЛЕКСІ СУДНА

Савченко В. С.,

студ. групи 5211м

кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна.

savcenkov220@gmail.com

Анотація. *Забезпечення діючих вимог ІМО щодо екологічності морських перевезень є актуальною задачею. Можливим шляхом вирішення цього питання може бути вдосконалення суднових пропульсивних установок. Для таких суден як балкери або танкери доцільним можна вважати використання енергії відновлювальних джерел енергії, а саме повітряних течій. Вибір найбільш раціонального типу вітрової пропульсивної установки потребує вивчення особливостей існуючих варіантів таких енергетичних систем.*

Ключові слова: *пропульсивний комплекс, модернізація, ротор Флеттнера, ефективність, економія, викиди.*

Ціль роботи – аналіз досвіду використання сучасних вітроенергетичних установок на транспортних суднах.

Вітрові додаткові пропульсивні установки, або WAPS (Wind Assistant Propulsion System) використовуються на судах, саме як додаткові, оскільки їх ефективність багато в чому залежить від поточних метеорологічних умов, напрямів руху судна та вітра, що ілюструє рис. 1.

На поточний момент часу в практиці суднобудування зростає інтерес щодо використання WAPS як в проєктах побудови нових суден, так і при реалізації проєктів модернізації та оновлення (Retrofitting project).

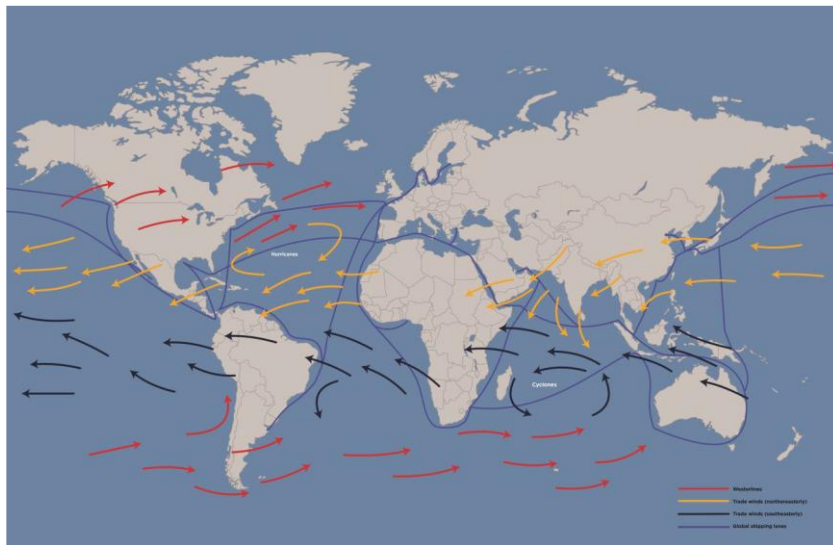


Рис. 1. Глобальні торговельні маршрути та якісна картина пасатів і західних вітрів, (глобальна матриця ймовірності вітрів ІМО, МЕРС.1/Circ.896

1. Жорсткі вітрила. Жорсткі вітрила функціонують подібно до традиційних м'яких вітрил: аеродинамічні сили підйому та опору виникають внаслідок взаємодії між вітром і вітрилами. Проте жорсткі вітрила мають задану геометрію та виготовлені з легких і міцних матеріалів, таких як армоване вуглецеве волокно (рис. 2).



Рис. 2. Приклад використання жорстких вітрил [2]

Зазвичай вітрила можуть рухатись для налаштування до напрямку вітру та для максимізації рушійної сили – ця функція часто автоматизована. Геометрія жорстких вітрил забезпечує більшу рушійну силу та вищий коефіцієнт корисної дії порівняно з традиційними вітрилами.

Сучасні жорсткі вітрила бувають різних розмірів – від 12 метрів у висоту на малих вантажних суднах до 50 метрів на деяких балкерах.

2. Ротори Флеттнера. Роторні вітрила (ротори Флеттнера) – це обертові циліндричні ротори, які вертикально встановлюються на палубі судна та приводяться в дію невеликими електродвигунами (рис. 3). Останнім часом такі допоміжні рушії часто встановлюють під час докування суден, що перебувають в експлуатації, з метою модернізації їх пропульсивних установок.



а



б

Рис. 3. Модернізація пропульсивної установки балкера Berge Neblina:

а – судно до модернізації; *б* – судно з встановленими роторною WAPS [4]

Обертювий ротор у вітряному потоці створює перепад тиску на своїй поверхні в напрямку, перпендикулярному до вітру (ефект Магнуса), унаслідок чого виникає рушійна сила. Найвищої ефективності досягають за бічного вітру (відносний кут $\approx 90^\circ$ або 270°), коли підйомна сила найсприятливіше зорієнтована відносно курсу судна. За руху проти вітру ротор практично не дає економії, а за попутного – очікувана економія невелика через додатковий аеродинамічний опір.

Ці закономірності ілюструє рис. 4, де показано відносне зменшення потужності головного двигуна від двох роторних вітрил (%) як функцію відносного кута вітру та істинної швидкості вітру для типового танкера дедвейтом 100 000 DWT, що йде зі швидкістю 12 вузлів. Оскільки підйомна сила, створювана роторами, завжди перпендикулярна до вектора швидкості вітру, максимальна економія досягається за відносних кутів, наближених до $\pm 90^\circ$.

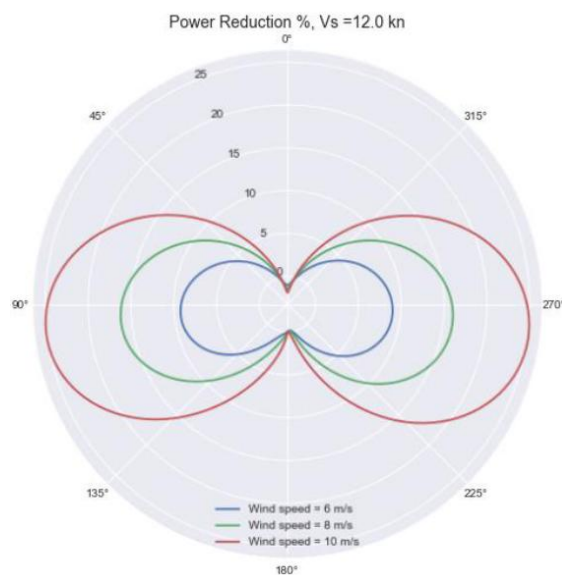


Рис. 4. Зменшення потужності головного двигуна від відносного кута вітру

Така залежність від напрямку вітру є суттєвим недоліком притаманним цим пристроям. Крім того, через обертання роторів можуть виникати вібрації та шум, які необхідно контролювати. Висота сучасних роторних вітрил становить від 18 до 35 метрів, а діаметр – до 5 метрів.

3. Вітрило з активною аспірацією. Аспіраційні вітрила (eSAIL) – це вертикальні еліптичні конструкції, змонтовані на палубі судна. На відміну від роторних вітрил, їхні зовнішні поверхні не обертаються для генерування тяги; водночас самі вітрила можуть орієнтуватися відносно вітру, автоматично повертаючись у сприятливе положення (рис. 5).

Конструкція передбачає вентиляційні отвори та внутрішній вентилятор, що реалізує відсмоктування прикордонного шару, унаслідок чого формується додаткова тяга – понад ту, яку забезпечує аеродинамічний профіль крила (аналогічно до жорстких вітрил).



Рис. 5. Приклад використання eSAIL® фірми **bound4blue** [4]

Найвищої ефективності аспіраційні вітрила досягають за бокового вітру; натомість за лобового або попутного вітру їхня ефективність практично нульова. Типові геометричні параметри охоплюють висоти від 10 до 36 м; зазвичай на судні встановлюють два або чотири крила, хоча в окремих випадках обмежуються одним.

4. Кайт системи. Кайти можуть кріпитися до носової частини судна для створення підйомної сили та тяги. Їх потрібно запускати або прибирати залежно від вітрових умов, і для цього вже розроблено автоматизовані системи. У порівнянні з іншими технологіями, кайти можуть використовувати вищі швидкості вітру, що спостерігаються на більших висотах.

Існують невеликі кайти, призначені для прогулянкових або риболовецьких човнів, і мають площу від **10 до 40 м²**, а для великих суден найбільший на сьогодні діючий кайт має площу **1 000 м²**, а також розробляються системи з кайтом площею до **5 000 м²**. Вважається, що кайт-системи доцільно використовувати для суден зі швидкістю менше 16 вузлів.

Операційна доступність кайт-систем є визначальним чинником їхньої ефективності. З огляду на панівні вітри та інші експлуатаційні обмеження припускається, що кайт-системи можуть працювати лише близько 20% часу на невеликих судах і до 30 % – на великих. Найбільшого ефекту такі системи досягають на довгих лінійних маршрутах (рис. 6).



Рис. 6. Приклад використання кайт-систем

Цікавим рішенням є використання комбінації WAPS різного типу. Так компанія Kongsberg концептуальний проєкт балкера, показаний на рис. 7, який передбачає встановлення на судні одночасно роторів Флеттнера та eSAIL.

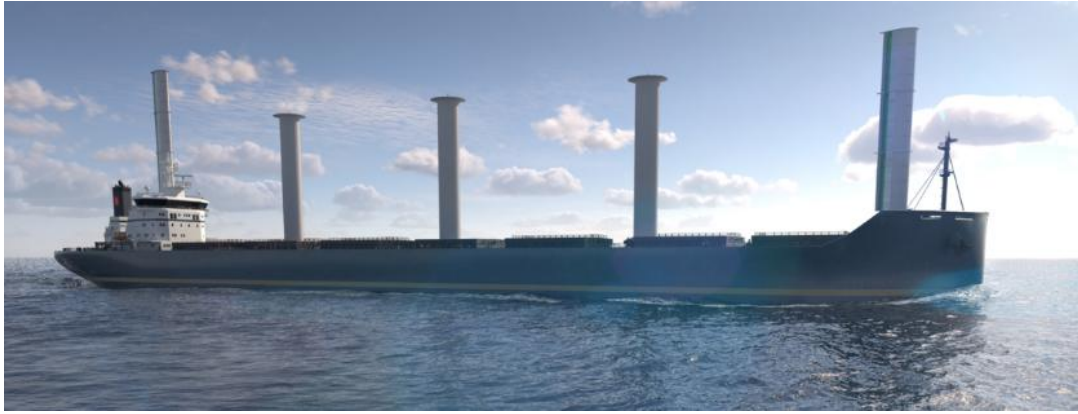


Рис. 7. **Kongsberg**: Концептуальний проєкт балкера [3]

Як вважають фахівці компанії Kongsberg, така комбінація вітрових двигунів дозволяє покращити експлуатаційні характеристики судна.

Висновки.

1. Системи роторних вітрил найбільш ефективні для крупнотонажних суден, таких, як балкери або танкери, де їх встановлення може забезпечити значну економію палива.
2. Для менших суден оптимальним варіантом будуть аспіраційні вітрила, які забезпечуватимуть достатню тягу для невеликого судна, при меншому рівні шуму і вібрацій.
3. Доцільним є використання підходу компанії Kongsberg який передбачає комбінацію декількох систем WAPS для більшої гнучкості і практичності у використанні.

Література.

1. Norsepower. (n.d.). *Norsepower Rotor Sail™ Saving fuel – and the planet* [Brochure]. Retrieved December 9, 2025, from https://www.norsepower.com/app/uploads/2023/08/brochure_ENG_screen.pdf
2. Berge Bulk. (n.d.). [Homepage]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.bergebulk.com/>
3. Kongsberg Maritime. (n.d.). [Homepage]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.kongsberg.com/maritime/>
4. bound4blue. (n.d.). *eSAIL - Wind-Assisted Propulsion Systems for vessels*. Retrieved December 9, 2025, from <https://bound4blue.com/esail/>
5. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2023). *Potential of wind-assisted propulsion for shipping* [Technical report]. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5078-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping.html>
6. Berger Maritiem. (n.d.). *Wind-assisted propulsion system ship*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.bergermaritiem.nl/en/wind-assisted-propulsion-system-ship>

APPLICATION OF WAPS IN THE SHIP PROPULSION COMPLEX

Savchenko V.S. Master's student, Group 5211M
Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, Admiral
Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
savcenkov220@gmail.com

Abstract. *Ensuring compliance with the IMO's environmental requirements for maritime transport is a pressing task. One viable pathway is to upgrade ship propulsion complexes. For vessels such as bulk carriers and tankers, it is reasonable to consider harnessing renewable energy—specifically, wind energy. Selecting the most suitable type of wind-assisted propulsion system requires an examination of the characteristics and limitations of existing solutions.*

Keywords: propulsion complex, retrofit, Flettner rotor, efficiency, fuel saving, emissions.

УДК 629.5.03

SHIP-HULL DRAG REDUCTION VIA THE DAMEN AIR CAVITY SYSTEM

Halai A. I.,

Master's student, Group 5211m

Department Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The study examines existing Air Lubrication Systems (ALS) employed in ship retrofiting. Three ALS types – MBDR (micro-bubble drag reduction), ALDR (air-layer drag reduction), and ACDR (air-cavity drag reduction) – are analyzed with respect to their design features and operational experience. The findings indicate that, for river – sea vessels, the Damen Air Cavity System is the most appropriate choice.

Keywords: air lubrication, energy efficiency, friction resistance reduction, decarbonization.

Introduction. In 2023, the International Maritime Organization (IMO) adopted an updated strategy for reducing greenhouse gas (GHG) emissions from ships. The strategy anticipates wide deployment of zero- or near-zero-emission fuels across the fleet and sets a clear decarbonization pathway, including interim targets: at least a 20 % reduction in GHG emissions by 2030 (with an ambition of 30 %) and at least 70 % by 2040 (with an ambition of 80 %), relative to 2008 levels.

A key milestone is that, by 2030, technologies, fuels, and/or energy sources with zero or near-zero emissions should account for 5–10 % of total energy consumption in international shipping, laying the groundwork for achieving net-zero GHG emissions around 2050 [1].

To meet these objectives, researchers worldwide are advancing technologies that enable the transition to low-emission energy sources. Among the most effective operational measures are air lubrication systems (ALS).

ALS represent a promising approach to reducing hydrodynamic resistance by introducing air along the hull to create a partial barrier between the vessel and the surrounding water, thereby targeting skin-friction drag, the dominant component of total resistance.

Three principal modes are distinguished: microbubble drag reduction (MBDR), which injects microbubbles into the boundary layer to reduce local density and modify turbulence; air-layer drag reduction (ALDR), which maintains a continuous gas film separating the hull from the water; and air-cavity drag reduction (ACDR), which isolates portions of the wetted surface within gas-filled cavities.

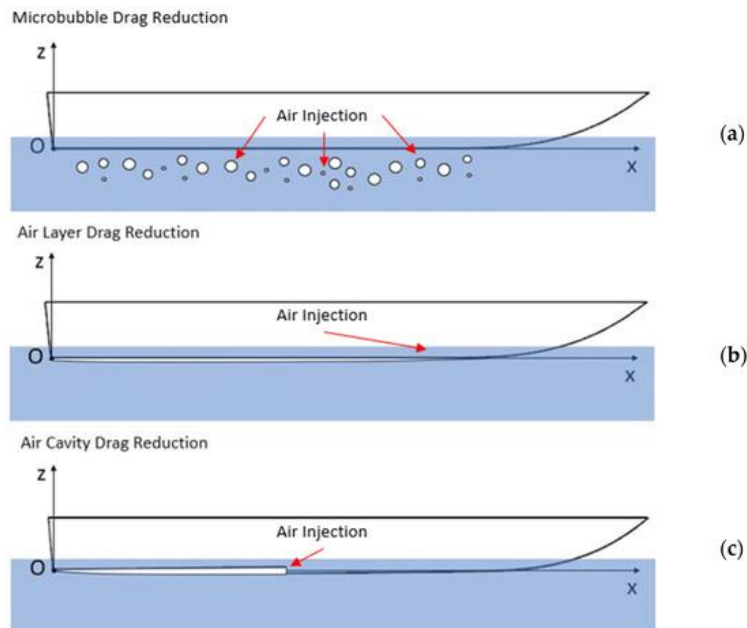


Figure 1. The different techniques for reducing drag through air lubrication: (a) the microbubble drag reduction (MBDR), (b) the air layer drag reduction (ALDR), and (c) the air cavity drag reduction (ACDR)

Under idealized conditions, MBDR has demonstrated drag reductions of up to 80 %, while ACDR can reach 35 %; in practical applications, commercial systems such as Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) and Damen Air Cavity System (DACS) have achieved fuel-consumption reductions on the order of ~5 % and ~7–12 %, respectively [2].

Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) – uses blowers to create the high pressure and large airflow required for installation on bulk carriers, container ships, ferries, and large passenger ships [3].

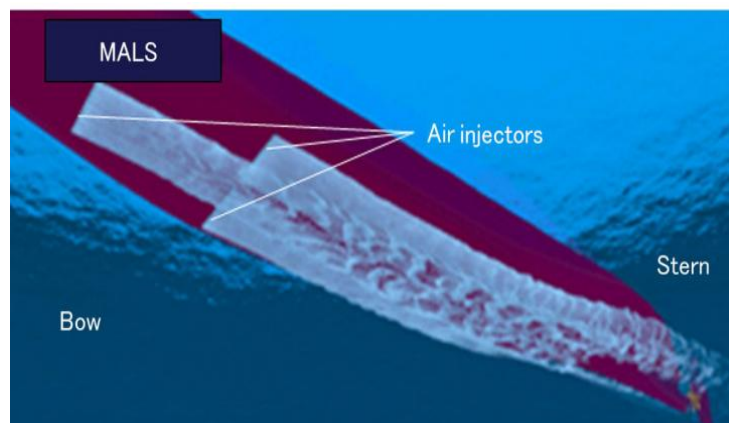


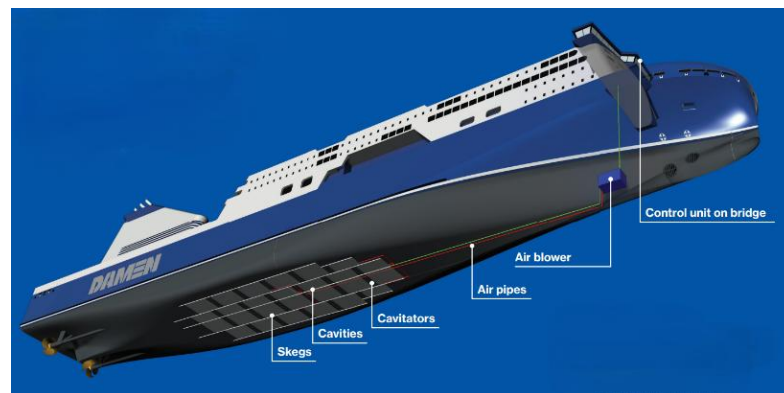
Figure 2. Mitsubishi (MALS)

Silverstream Technologies – has developed an Air Lubrication System (ALS), that injects tiny bubbles beneath the ship's hull to reduce friction between the vessel and the water. The system uses compressors to deliver air through a network of pipes and valves to Air Release Units (ARUs) positioned along the length of the hull [4].



Figure 3. Silverstream Technologies (MBDR)

The **Damen Air Cavity System (DACS)** is a patented air lubrication system (ALS) developed jointly by Delft University of Technology (TU Delft) and Damen Shipyards Group [5]. To confine the air layer, longitudinal skogs are fitted to limit air escape [6]. Because the compressors need only overcome the hydrostatic pressure corresponding to the vessel's draft, the required airflow and power are substantially reduced. To maximize hull coverage, a sequence of cavities is arranged along the bottom, separated by transverse skogs [7]. In this configuration, air carried downstream from one cavity is recaptured by the next, helping to maintain a stable air layer. The result is a reduction in total resistance through a decrease in wetted surface area and frictional drag, yielding higher propulsive efficiency, lower fuel consumption, and reduced emissions.



a

DACS is adapted to each vessel to maximise the use of the flat bottom area, see below examples

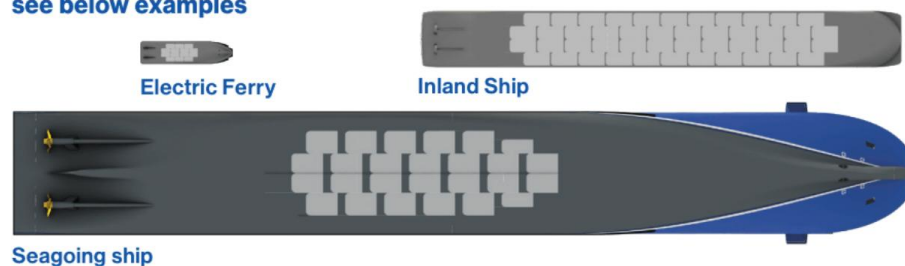


Figure 4. Example of maximum use of the flat bottom area of a vessel DACS:

a) – components of the DACS system; b) – DACS system for different ships

The technology is particularly effective for low-Froude-number vessels: inland waterway ships typically achieve 10–20 % savings in fuel and emissions, while seagoing vessels realize 5–12 % reductions [8]. In 2023, DACS was installed on the Amisco cargo vessel Danita in Tallinn; independent verification by the classification society RINA confirmed up to 15 % reductions in fuel consumption and CO₂ emissions [9].

Figure 5 illustrates the retrofit process of a inland ship (river–sea vessel) in a floating dock. The work plan provided for the installation of the Damen Air Cavity System. The ship power plant equipment was supplemented with dedicated high-pressure blowers, distribution ducting, and monitoring and control equipment, while the system's external elements were mounted on the vessel's bottom shell



Figure 5. River–sea vessel retrofit in a floating dock

Conclusion

Among the ALS technologies reviewed, the Damen Air Cavity System (DACS) is the most effective retrofit option for existing inland vessels. It delivers substantial reductions in hull frictional resistance and fuel consumption, typically 10–20 %, with the greatest benefits observed on vessels with wide, flat bottoms.

The system is straightforward to install and requires only minor structural modifications to the hull.

References

1. International Maritime Organization (IMO). (n.d.). *Cutting GHG emissions*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/cutting-ghg-emissions.aspx>
2. Li, H., Chen, M., Yang, X., & Li, C. (2024). Microbubble Drag Reduction (MBDR) involves... *Applied Sciences*, 14(13), 5888. [https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5888#:~:text=Microbubble%20drag%20reduction%20\(MBDR\)%20involves,reduces%20drag%20in%20that%20area.](https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5888#:~:text=Microbubble%20drag%20reduction%20(MBDR)%20involves,reduces%20drag%20in%20that%20area.)
3. Takahashi, A., & Fujiwara, T. (2015). *Mitsubishi Air Lubrication System (MALs)*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 52(1), 50-54. <https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e521/e521050.pdf>

4. Silverstream Technologies. (n.d.). *What is air lubrication?* Retrieved December 9, 2025, from <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/>
5. Damen. (n.d.). *Damen Air Cavity System*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.damen.com/equipment/green-solutions/damen-air-cavity-system>
6. [Untitled document]. (n.d.). Retrieved December 9, 2025, from <https://drive.google.com/file/d/1jRzImdPnDzmj1aJ-WoJkhiZiYHgtT9rm/view>
7. [Untitled document]. (n.d.). Retrieved December 9, 2025, from https://drive.google.com/file/d/1ptKL5_f3eFoLUQfQp8p-RpKBpfBJ10r/view
8. [Untitled document]. (n.d.). Retrieved December 9, 2025, from <https://drive.google.com/file/d/1n5PgxsNoKUU6kmusv-C0YoSAbv7l-ZJK/view>
9. Damen. (n.d.). *Damen Air Cavity System*. Retrieved December 9, 2025, from <https://www.damen.com/equipment/green-solutions/damen-air-cavity-system>

SHIP-HULL DRAG REDUCTION VIA THE DAMEN AIR CAVITY SYSTEM *Halai A. I.*

Master's student, Group 5211M
Department Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The study examines existing Air Lubrication Systems (ALS) employed in ship retrofiting. Three ALS types—MBDR (micro-bubble drag reduction), ALDR (air-layer drag reduction), and ACDR (air-cavity drag reduction)—are analyzed with respect to their design features and operational experience. The findings indicate that, for river–sea vessels, the Damen Air Cavity System is the most appropriate choice.

Keywords: air lubrication, energy efficiency, friction resistance reduction, decarbonization.

УДК 621.165:621.313.333

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ ГАЗОВОЗА КОРЕЙСЬКОЇ ПОБУДОВИ

Бондаренко М. С., к. т. н., доцент

НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

mykola.bondarenko@nuos.edu.ua ORCID.ORG/0009-0003-7063-9889

Чередніченко О. К., д. т. н., професор

НУК імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Анотація. Виконаний аналіз складу теплової схеми паротурбінної установки; наведені параметри основного комплектуючого обладнання: головного турбозубчастого агрегата, головних котлів, допоміжного обладнання установки – електростанції, опріснювальних установок тощо; розглянуті перспективи використання паротурбінних установок на LNG-суднах.

Ключові слова: теплова схема, система регенеративного підігріву живильної води, головний турбозубчастий агрегат, електростанція, опріснювальна установка.

Основний текст

Теплова схема ПТУ судна для перевезення зрідженого природного газу (побудованого в Кореї в 2002 р.) відзначається достатньо несподіваною простотою (рис. 1.):

- по-перше, використаний цикл без проміжного перегріву пари;

– по-друге, система регенерації тепла включає тільки два регенеративних підігрівача живильної води: низького тиску, що використовує пару з відбору ТНТ і деаератор, який живиться паром із ресивера після ТВТ.

Очевидно в основу комплектації ПТУ закладена ідея зменшення металоємності; скорочення витрат на побудову, обслуговування і ремонт енергетичного обладнання; підвищення експлуатаційної надійності установки навіть в ущерб її тепловій економічності. Теплова економічність енергетичної установки, що використовує випаровуваний газ, можливо не стала для проєктантів домінуючою, тут швидше більшу роль відіграв баланс кількості одержаного газу в результаті випару з вантажних танків і його споживанням енергетичною установкою прийнятої потужності.

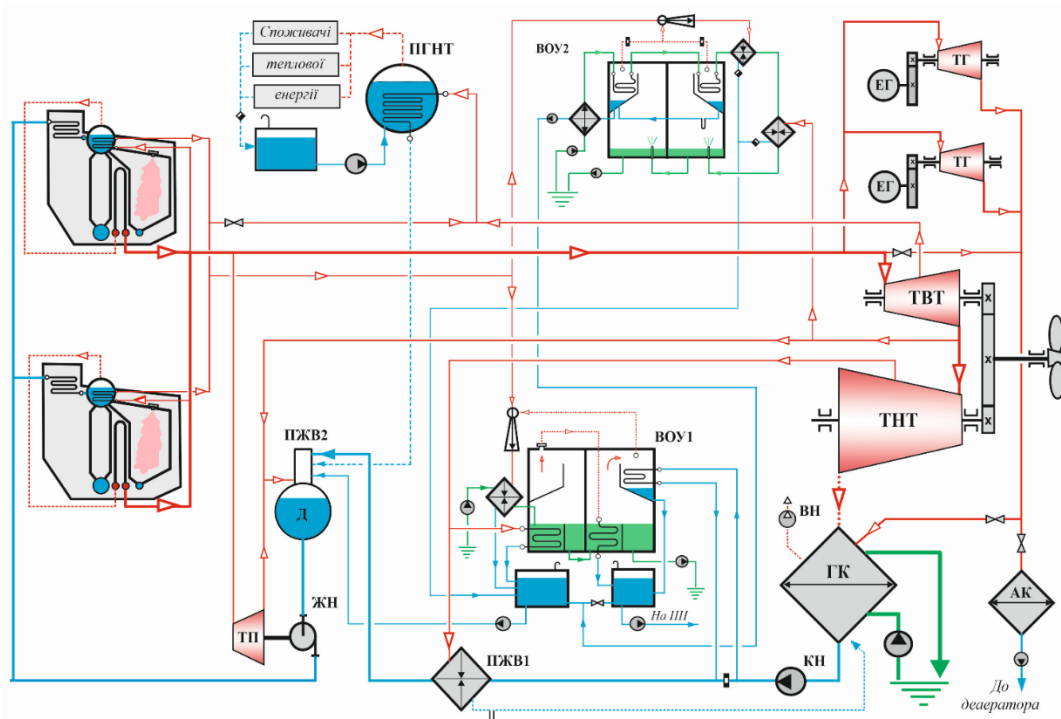


Рис. 1. Теплова схема ПТУ

ПТУ має у своєму складі два головних котла, що очевидно пов'язано із забезпеченням надійності паропостачання головного турбозубчастого агрегату (ГТЗА).

Окрім цього до складу ПТУ входить парогенератор низького тиску (ПГНТ), що живиться паром із відбору ТВТ, дві опріснювальні установки киплячого та адіабатного типу продуктивністю по 60 т на добу кожна, два турбогенератори, три живильних насоси з турбоприводами, вакуумний насос для підтримки розрідження в головному конденсаторі.

Система живлення котла. Система живлення котла забезпечує подачу води з деаератора живильними насосами до парового барабана котла. Нагріта живильна вода збирається в деаераторі, який виконує роль збірного бака системи. Рівень в деаераторі підтримується за рахунок автоматичної роботи клапанів живлення. Високе розташування деаератора в

машинному відділенні забезпечує достатній підпір води на всмоктуванні головного живильного насоса.

Хімічна речовина (гідразін), впорскується в лінію всмоктування головних живильних насосів для видалення залишків кисню в живильній воді. Дозування гідрозину організовано таким чином, щоб підтримувати його резервну кількість в котлах.

Три основні живильні насоси з'єднані колектором, один з них використовується, а другий знаходиться в гарячому режимі очікування. Третій насос може бути використаний, якщо будь-який з двох інших вийде з ладу. Резервний агрегат автоматично запускається і працює в разі падіння тиску подачі.

Живильні насоси – це горизонтальні багатоступінчасті відцентрові агрегати продуктивністю 112/140 м³/год. (номінальна/максимальна) з приводом від парових турбін, які працюють на свіжій парі, відпрацьована пара використовується в якості гріючої в деаераторі (разом з парою регенеративного відбору).

Живильна вода може бути спрямована через економайзер, або в обхід нього і надходити безпосередньо в котел. Пневматичний регулюючий клапан відкривається, щоб дозволити живильним насосам повертати воду назад в деаератор. Коли котли працюють на низьких навантаженнях (головна турбіна в режимі маневрування) цей клапан відкривається автоматично, дозволяючи воді потрапляти у водяну камеру в нижній частині деаератора.

Для заповнення котла і при дуже низьких навантаженнях використовується аварійний живильний насос. Цей агрегат має електричний привід, але, як і основний живильний насос, забирає воду з деаератора або основного бака дистильованої води і може нагнітати її через основну або допоміжну живильну лінію до котла.

Остаточна подача живильної води до котлів здійснюється через економайзери, де температура підвищується з 139,8 °С до 224 °С. Економайзери розміщені на шляху димових газів з топки, використовують тепло відхідних газів. В аварійних умовах водяну частину економайзера можна обійти, а живильну воду подавати безпосередньо в барабан котла. Якщо це необхідно, потік пари повинен бути обмежений.

Загальні характеристики гребного турбозубчастого агрегата (ГТЗА) наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Загальні характеристики ГТЗА

Величина	Позначення	Од. виміру	Значення
Максимальна тривала ефективна потужність	N_{MCR}	кВт	26478
Частота обертів гребного гвинта при N_{MCR}	$n_{ГТ}$	хв. ⁻¹	88

Частота обертів ТВТ	$n_{\text{ТВТ}}$	хв. ⁻¹	4962
Частота обертів ТНТ	$n_{\text{ТНТ}}$	хв. ⁻¹	3275
Номинальна потужність	Ne	кВт	23830
Частота обертів гребного гвинта при Ne	$n_{\text{ГГ}}$	хв. ⁻¹	85
Параметри пари на вході в турбіну:			
тиск	P_0	бар	58,84
температура	t_0	°C	510
Тиск пари на виході із турбіни (в конденсаторі)	P_x	бар	0,049
Температура забортної води	$t_{\text{зв}}$	°C	24

Головна рушійна установка – турбіна типу Kawasaki UA з двоступінчастим редуктором, включає турбіну високого тиску (ТВТ), турбіну низького тиску (ТНТ), блок маневрових клапанів і двоступінчастий редуктор із зовнішнім зачепленням.

Турбіна заднього ходу може розвивати не менше 80 % максимального крутного моменту переднього ходу при частоті обертання 50 % від максимальної передньої та здатна працювати на задньому ході на 70 % максимальної частоти обертання переднього ходу протягом до двох годин, без перегріву елементи.

Система підключення забезпечує незалежну роботу ТВТ та ТНТ в аварійних випадках. Це досягається за допомогою аварійної подачі пари від парової лінії постійного струму до турбіни низького тиску або аварійного випускного з'єднання від перехресної труби до випускного корпусу турбіни низького тиску.

Турбіна високого тиску. Турбіна високого тиску однокорпусна, активного типу. Упорний підшипник турбіни фірми Mitchell розташований на передньому кінці турбіни. Індикатор осевого переміщення та датчик вимірювання вібрації встановлені на кінці ротора з упорним підшипником.

Турбіна низького тиску та турбіна заднього ходу. Турбіна низького тиску однопотокова активного типу і має кілька ступенів з частковою реактивністю, турбіна заднього ходу розташована на випускному кінці турбіни низького тиску і складається з двох коліс Кертиса. Упорний підшипник турбіни типу Mitchell розташований на передньому кінці турбіни. Індикатор осевого переміщення та датчик вібрації встановлені на кінці ротора з упорним підшипником.

Маневровий клапан. Маневрена заслінка складається з передньої дросельної заслінки, задньої дросельної заслінки та гідроциліндра, які встановлені на одній балці з ТВТ. Дросельні заслінки приводяться в дію гідроциліндром. Механічний редуктор призначений для аварійного спрацювання дросельних заслінок при несправності гідросистеми.

Головний редуктор. Крутний момент, створюваний турбінами високого та низького тиску, передається на першу ступінь редуктора через гнучкі муфти, а потім на другу ступінь через зубчасті муфти.

Валоповоротний механізм. Поворотний редуктор встановлений збоку ТВТ, перша ступінь редуктора планетарного типу. Двигун встановлений у верхній частині планетарного редуктора і повертає головний вал на один виток приблизно за 6 хвилин за допомогою поворотного механізму. Втулка на кінці валу поворотного двигуна використовується для ручного повороту за допомогою ручки. Передбачено пристрій блокування між поворотним механізмом і маневреними клапанами.

Головний конденсатор. Головний конденсатор встановлено поперек судна і підтримується на рамі корпусу власним кронштейном. Конденсатор прямотрубний, з підігрівом, поверхневим охолодженням, призначений для одноразового проходу циркулюючої води і забезпечений секцією повітряного охолодження.

Вакуумний насос. Основний конденсатор обслуговується двома вакуумними насосами (один запасний). Вакуумний насос горизонтального водокільцевого типу.

Система дистанційного керування. Система дистанційного керування головною турбіною призначена для управління обертами гребного валу або просто маневрування підйомом клапана за допомогою телеграфного важеля, встановленого на консолі управління містком.

Головний котел. Котел розроблений і виготовлений компанією Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Конфігурація топки пристосована для спалювання палива з пальниками, розташованими зверху топки, рівномірне поглинання тепла досягається по всій ширині печі; екранна труба, пароперегрівач і група випарних труб не мають надмірного локального перегріву.

Головний котел складається з двох барабанів і водяних трубопроводів між ними, топки з водяним охолодженням, пароперегрівача, економайзера і парового повітрянагрівача. Вертикально розташовані труби пароперегрівача не потребують громіздких сталевих опор і, за відсутності горизонтальних частин, майже не мають відкладень шлаку. Лінійне розміщення труб пароперегрівача також забезпечує доступні шляхи для ефективної роботи сажообдувної системи очищення.

Температура пари контролюється зануреними пароохолоджувачами, а проєктна температура перегрітої пари повинна бути досягнута при роботі на мазутному спалюванні. Загальні характеристики котла наведені в табл. 2.

Суднова електростанція. До складу СЕС входять два електрогенератори з турбінним приводом і стоянковий дизель-генератор потужністю 3640 кВт з привідним двигуном 8L32/40.

Паротурбінний привід використовує свіжу пару з параметрами $P_0 = 58,84$ бар, температурою $t_0 = 510$ °C зі скидом пари в головний конденсатор. У нештатних ситуаціях можлива робота ТГ на резервний атмосферний конденсатор. Частота обертів привідної турбіни

складає 10036 хв.⁻¹, електрогенератора – 1800 хв.⁻¹; одноступінчатий редуктор має передавальне відношення 5,576.

Таблиця 2. Загальні характеристики головного котла MB-4E-NS

Величина	Позначення	Од. виміру	Значення
Максимальна паропроодуктивність	$D_{\max}$	т/год.	56
Номинальна паропроодуктивність	D_{Π}	т/год.	49
Параметри свіжої пари (на виході із котла):			
тиск	P_0	бар	60,3
температура	t_0	°C	515±5
Тиск у верхньому пароводяному колекторі	P_{κ}	бар	76,5
Тиск у нижньому водяному колекторі	$P_{\text{нк}}$	бар	76,0
Тиск у пароперегрівнику	$P_{\text{пп}}$	бар	63,5
Температура живильної води	$t_{\text{жв}}$	°C	139,8
Коефіцієнт надлишку повітря	α	–	1,1
Температура відхідних (димових) газів	$t_{\text{вг}}$	°C	170
ККД котла при вищій теплоті згоряння	$\eta_{\text{пг}}$	–ц	0,885
Вища теплота згоряння мазуту (Bunker C)	$Q_{\text{рвм}}$	МДж/кг	43,03
Вища теплота згоряння випарного газу	$Q_{\text{рвг}}$	МДж/кг	55,59
Витрати мазуту:			
при максимальній продуктивності	$B_{\Pi \max}$	кг/год.	4064
при номінальній продуктивності	B_{Π}	кг/год.	3565
Витрати випарного газу (метану):			
при максимальній продуктивності	$B_{\Pi \max}$	кг/год.	3320
при номінальній продуктивності	B_{Π}	кг/год.	2912
Температура подачі паливного газу		°C	30
Тиск подачі газу, на вході регулюючого клапана		бар	0,98
Густина випарного газу при робочому тиску 1 бар	$\rho_{\text{г}}$	кг/м ³	0,7158

Матеріальні баланси генераторів дистильованої води (опріснювальних установок) наведені на рис. 2–3.

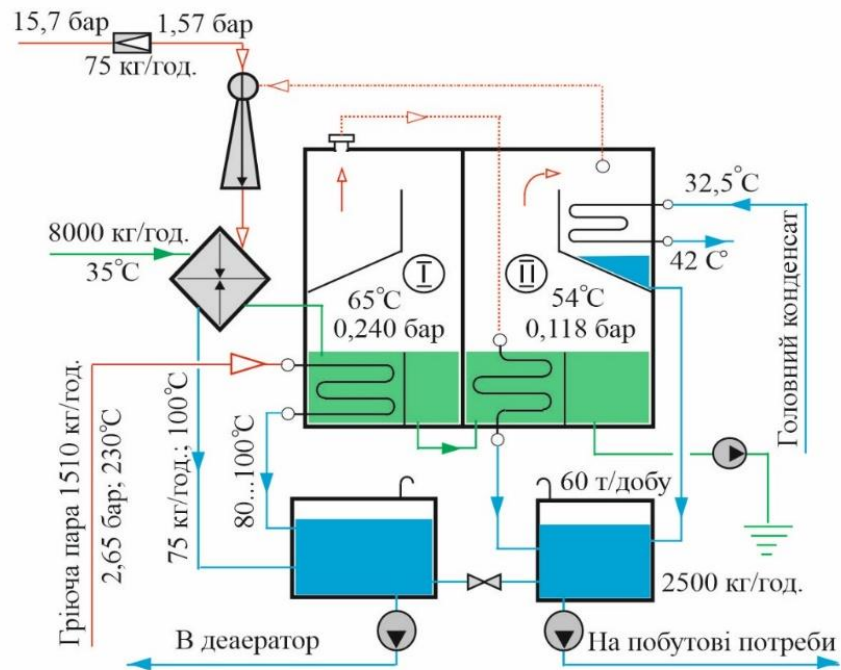


Рис. 2. Матеріальний баланс двоступінчатої ОУ киплячого типу

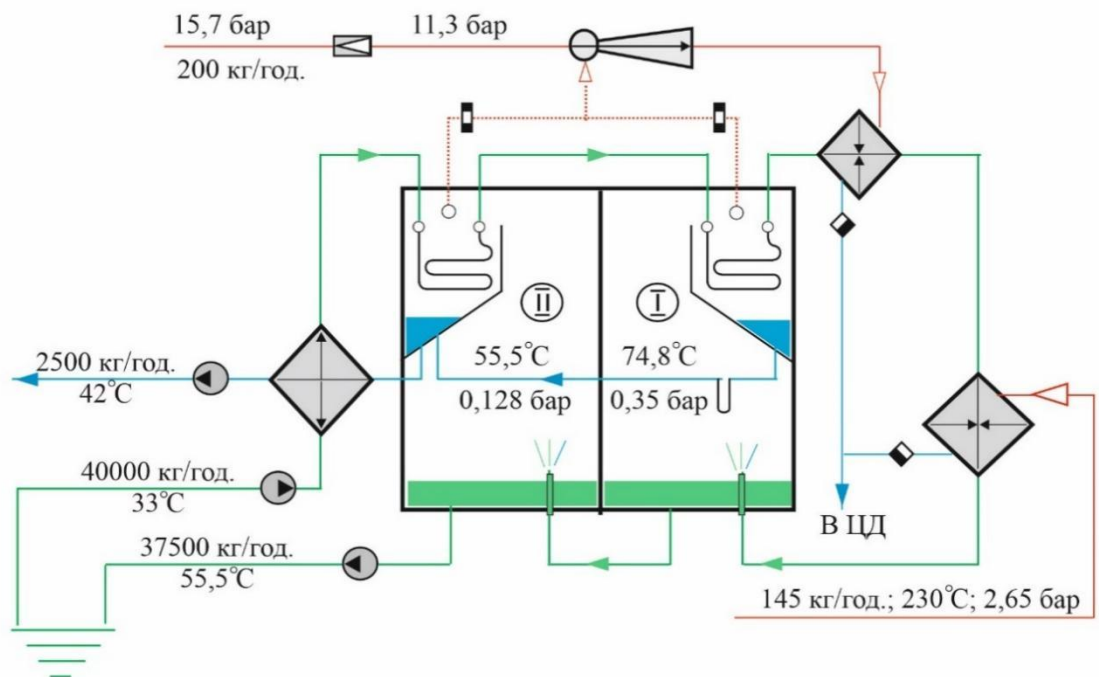


Рис. 3. Матеріальний баланс двоступінчатої ОУ адіабатного типу

Показники теплової економічності установки на номінальному режимі роботи при використанні випарного газу:

– питома витрата випарного газу

$$g_e = B_n / Ne = 2912 \times 2 / 23830 = 0,244 \text{ кг/(кВт·год.)};$$

– ефективний ККД установки

$$\eta_e = 3600 / (Q_{\text{пвр}} \cdot g_e) = 3600 / (55590 \cdot 0,244) = 0,265.$$

Перспективи використання ПТУ на LNG-суднах

В історичному плані:

– ПТУ застосовувалися на таких суднах тому, що випарний газ під час транспортування ЗПГ, можна було відразу спалювати в котлах з використанням простої, надійної і довговічної парової турбіни;

– відсутність на той момент двопаливних ДВЗ потрібної потужності.

Наразі ПТУ втрачають позиції, що пов'язано з наступним:

– низький ККД ПТУ: 25...32%; у дизельних і газових двигунів (DFDE, ME-GI, X-DF): 45...50 %;

– обмеження ІМО на викиди: щоб залишитися в межах норм, ПТУ потрібно або замінювати, або переводити в гібридний режим (наприклад, з рекуперацією тепла);

– складність модернізації: неможливо просто «взяти і поміняти» ПТУ на сучасний двигун без капітальної переробки судна, це дорого і технічно складно.

Паротурбінні установки ще зберігаються

– на старих LNG-суднах, де повна заміна неможлива;

– у проєктах з великим надлишком випарного газу де ПТУ може бути вигідною як «утилізатор»;

– на окремих військових/спеціальних суднах, де важлива надійність і плавність ходу і висока маневреність.

На зміну прийшли установки з двигунами внутрішнього згоряння

– DFDE (двопаливні дизель-електричні): надійність, маневреність, паливна гнучкість;

– ME-GI (двопаливні з уприскуванням газу): високий ККД, пряма передача на вал, низькі викиди;

– X-DF (низького тиску, двотактні): високий ККД, відповідність ІМО Tier III без SCR.

Перспективи використання ПТУ в LNG-суднобудуванні:

– нове будівництво: практично виключене;

– існуючий флот: зберігаються з доопрацюванням;

– ретрофіт/гібриди: обмежене застосування;

– у довгостроковій перспективі: вмере, як мейнстрім.

Висновок

ПТУ на LNG-суднах – епоха, що відходить. У нових проєктах вони повністю витіснені дизелями та гібридними установками. На старому флоті ПТУ зберігаються в рамках ресурсу, але в міру зносу – будуть замінюватися або списуватися.

ЛІТЕРАТУРА

1. EXMAR. Cargo Operating Manual (H2206)
2. Machinery Operating Manual LNGC EXCALIBUR (H2206)
3. Подушко Л.О., Синенко Л.О. Теплофізичні властивості води і водяної пари.

Довідковий матеріал. Навчальний посібник. Київський енергетичний фаховий коледж. – 1922 р.

**Analysis of the characteristics of a steam turbine installation
of a Korean-built gas carrier**

Mykola Bondarenko, Oleksandr Cherednichenko
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Abstract. *An analysis of the thermal circuit of a steam turbine plant has been performed; the parameters of the main component equipment are given: main turbine gear unit, main boilers, auxiliary equipment of the plant – power plant, desalination plants, etc.; the prospects for the use of steam turbine plants on LNG ships are considered.*

Keywords: *thermal cycle, regenerative feedwater heating system, main turbine gear unit, power plant, desalination plant.*

УДК 629.5.03

**ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ПЛАНОВОГО ТЕХНІЧНОГО
ОБСЛУГОВУВАННЯ СЕУ**

Ю. В. Кісетов, к. т. н., доцент¹, **Б. М. Личко**, к. т. н., доцент, зав. каф.²

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

¹kisetov499@ukr.net, ²bogdan.lychko@gmail.com

Анотація. *Проаналізовано сучасні підходи побудови систем планового технічного обслуговування суднового обладнання, особливості програмного забезпечення таких систем, які використовуються ведучими компаніями з управління суднами.*

Ключові слова: *технічне обслуговування, технічне управління, системи планового технічного обслуговування, програмне забезпечення.*

Вступна частина. Система планового технічного обслуговування (ТО) на судах є обов'язковою згідно з Міжнародним кодексом управління безпекою. В рамках технічного управління керуючий судном надає такі послуги, як складання бюджету, ТО, періодичні перевірки, постановка в сухий док, закупівля, документація, система управління безпекою (СУБ) та багато іншого [1-3]. Управляючі компанії стикаються зі зростанням адміністративного навантаження, пов'язаного з інвентаризацією, оцінкою нормативних вимог та ризиків, а також збільшенням необхідності аналізу даних для оцінки ефективності. Враховуючи величезний обсяг даних, що використовуються сьогодні для рішення задач ефективного управління процесом ТО суднового обладнання, потрібна ціла низка різних інструментів бізнес-аналітики, фахівців, які мають спеціалізовані знання в галузі інтелектуального аналізу даних для проведення аналітики та фокусування на критично важливих напрямках, що постійно складно підтримувати. Компанії з управління суднами використовують програмне забезпечення Planned maintenance system (PMS)

– систему планового ТО – яке дозволяє відстежувати численні роботи з ТО, які необхідно виконувати.

Мета роботи – аналіз і узагальнення набутого досвіду використання систем PMS, підходів до побудови структури вирішуваних задач та їх особливостей.

Основна частина. Розглянемо декілька прикладів систем PMS, які пропонуються на ринку морських перевезень. В сфері надання вказаних вище послуг виконавці використовують різноманітну термінологію для опису послуг і робіт які пропонуються.

Компанія Det Norske Veritas (DNV) розробила масштабний комплекс, який має назву «Система планового ТО на судах» (Planned maintenance system for technical ship management - ShipManager Technical). Система схвалена класифікаційним товариством DNV [4].

ShipManager Technical – це технічна система управління судном для планового та позапланового обслуговування, звітів про дефекти та управління технічними активами та даними.

Програмне забезпечення дає можливість отримати набір важливої інформації, вирішити ряд задач, а саме:

- оптимізація управління ТО суден;
- централізоване управління обладнанням та роботами з ТО всього обладнання судна;
- надання інформації для ефективної звітності з управління всім флотом за допомогою підсистеми бізнес-аналітики (ShipManager Analyzer);
- має простий у використанні спільний інтерфейс користувача між судном і берегом, що покращує зв'язок;
- дає можливість підготувати та задокументувати всі заплановані та незаплановані завдання з ТО;
- визначити та планувати завдання на основі лічильників/календаря та умов;
- категоризувати роботи та елементи відповідно до відповідних критеріїв, які критично, пов'язані з безпекою;
- автоматично оновлювати дані про запаси з урахуванням запасних частин, які використовуються для виконання завдань ТО;
- вести записи життєвого циклу кожного обладнання;
- ефективно керувати інвентаризацією небезпечних матеріалів;
- управляти дефектами;
- обмінювати обладнання для ТО та ремонту без втрати важливої інформації;
- мати централізовані списки завдань для бортових інженерів та технічного персоналу офісу;
- інтегруватися з іншими програмними модулями ShipManager.

Система планового ТО суден SHIPMATE фірми SBN Technologies Pvt. Ltd. (Індія) – це програмне забезпечення, що дозволяє власникам та операторам судів проводити ТО своїх суден

з інтервалами, встановленими виробниками та вимогами класу/класифікаційного товариства [5]. Програмне забезпечення SHIPMATE PMS – (Planned Maintenance System for Technical Ship Management – система/програмне забезпечення планового технічного обслуговування суден сертифікована Бюро Верітас.

Система SHIPMATE PMS для технічного керування судном забезпечує ведення графіка ремонтів та поповнення запасів, відіграє важливу роль у зниженні ризику аварій завдяки регулярному профілактичному обслуговуванню, допомагає забезпечити відповідність різних параметрів мореплавства судна стандартам, встановленим регулюючими органами та виробниками.

Підсистема керування ТО – Computerized Maintenance Management System (CMMS) допомагає знизити загальне навантаження та підвищити ефективність керування, включає спеціалізоване програмне забезпечення для системи планового ТО – Planned Maintenance System Software (PMSS). Особливості цієї системи:

- клас програмного забезпечення сертифікований Bureau Veritas;
- веде графік ТО;
- зберігає історію обслуговування;
- забезпечує автоматичне створення майбутніх завдань на ТО на основі встановлених правил;
- графічний інтерфейс для полегшення процесу планування робіт;
- відстеження історії робіт з технічного обслуговування, включаючи зображення обладнання/робіт;
- відстеження критично важливих запасних частин та обладнання; система оновлює всі транзакції, пов'язані із закупівлею та використанням запасів, та повідомляє про це всіх зацікавлених осіб на борту та на березі (ця функція забезпечує надання всім зацікавленим сторонам необхідної інформації, що підвищує прозорість та ефективність);
- ведення докладної та структурованої документації щодо робіт, таких як робочі процедури, креслення, запасні частини, які будуть використовуватись;
- передача даних «Судноплавна компанія–Судно–Судноплавна компанія» (дані та зображення) для синхронізації;
- управління запасами; заявки формуються на основі рівня запасів та критичності запасних частин; посилання на систему закупівель;
- слідкування за термінами дії сертифікатів і створення відповідних оповіщень.

На рис.1 наведено приклади інформаційних повідомлень системи, які використовуються екіпажем в процесі прийняття необхідних управлінських рішень.

Розглянемо ще декілька прикладів подібних систем.

Компанія Pacific Tug (Aust) Pty Ltd (Австралія) використовує систему технічні послуги у морських операціях (Technical Services in Marine Operations) [6]. Перелік пропонованих послуг базується на наступних положеннях, які компанія визначає як головні:

- *механічні системи – сюди входить ТО та ремонт двигунів, генераторів та інших механічних компонентів, що мають вирішальне значення для експлуатації судна;*
- *електричні системи – забезпечення правильної роботи електричних систем, таких як розподілення електроенергії, освітлення та електронне обладнання;*
- *навігаційне обладнання – регулярні перевірки та оновлення навігаційних засобів, таких як GPS, радары та компаси, для забезпечення точної та безпечної навігації.*
- *управління програмним забезпеченням та даними – впровадження оновлень програмного забезпечення та управління системами даних для оптимізації операційної ефективності та покращення процесів прийняття рішень.*

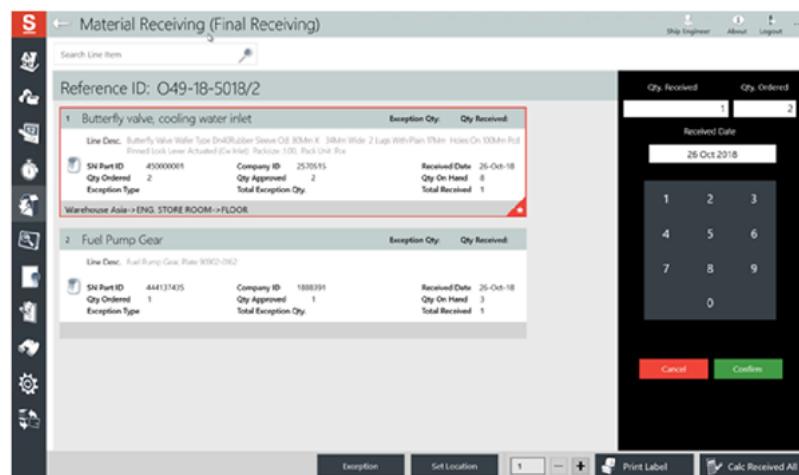


Рисунок 1 – Фрагмент інформаційних повідомлень системи SHIPMATE PMS

Фірма Shipnet (Норвегія) використовує комплексне технічне морське програмне забезпечення Shipnet Technical, яке оптимізує процедури технічного обслуговування [7]. Ядро технічного рішення базується на платформі Shipnet ONE, включає додатки: планове технічне обслуговування, модуль технічних дефектів, аналіз компонентів для ремонту або утилізації, керування запасами тощо. Система забезпечує відстеження історії ТО та ремонту в таких формах, як, наприклад, дані про прогини колінчастого валу, показання огляду танків і інше, що допомагає виявляти критичні області, на яких слід зосередитися в майбутньому.

Фірма Fleet Management Limited (Гонконг) використовує платформу «Інфраструктура планування та звітності для суден» – Planning and Reporting Infrastructure for Ship (PARIS) [8]. Система дозволяє здійснювати моніторинг продуктивності суден у режимі реального часу, проводити передиктивне обслуговування та забезпечувати безперебійний зв'язок між береговими командами та екіпажами у морі.

Аналіз наведених систем дає можливість виділити такі основні категорії спектра послуг з управління судном які реалізуються за допомогою систем комплексного морського програмного забезпечення (рис. 2).

Основними компонентами програмного забезпечення PMS можна визначити наступні.

Бюджетування. Ефективне використання ресурсів для скорочення експлуатаційних витрат. Наявність великого флоту під своєю опікою дозволяє компаніям управління судами працювати на економії масштабу і забезпечувати знижки на комісійні для своїх клієнтів, утримуючи експлуатаційні витрати в межах допустимого ліміту.

Обслуговування. Ефективне виконання передиктивного, профілактичного та аварійного обслуговування для забезпечення тривалого терміну служби всього обладнання на борту. Системи управління судами можуть забезпечити своєчасний графік ТО, який продовжує термін служби устаткування, гарантуючи, що судно отримає всі необхідні запасні частини, запаси і бункери.



Рисунок 2 – Основні категорії планової структури управління ТО

Інспекції і перевірки. Інспекції проводяться різними організаціями, такими як держави прапора, класифікаційні товариства, органи державного портового контролю та судноплавні компанії.

Перевірочні інспекції – це особливі види інспекцій, які проводяться на запит судновласників. Інспектор із перевірки надає судну оцінку, яка допомагає власникам пропонувати судно для перевезення вантажу через фрахтувальників. Це пов'язано з тим, що фрахтувальники покладаються на оцінки перевірки, щоб визначити придатність судна для перевезення їхнього вантажу, коли є кілька схожих суден. Серед організацій, які частіше всього перевіряють судна OCIMF (SIRE), Rightship, CDI та клуби P&I.

OCIMF (The Oil Companies International Marine Forum) – міжнародна асоціація нафтових компаній, яка займається просуванням безпеки та екологічної відповідальності в морському

транспортуванні нафтопродуктів та газу. SIRE (Ship Inspection Report) — програма, яка надає інструмент для оцінки ризиків і базу даних звітів про інспекції суден (розроблена OCIMF) [9].

В комплексі для підтримки безпеки в галузі, крім програми звітів про інспекції суден SIRE, ще функціонують:

- база даних про інспекції суден забезпечення платформ Offshore Vessel Inspection Database (OVID);

- інформаційна система морських терміналів Marine Terminal Information System (MTIS).

Інспекції суден RightShip оцінюють стан судна, якість та ефективність впровадження СУБ [10, 11]. RightShip – провідна в світі цифрова морська платформа, орієнтована на питання екології, соціальної сфери та управління – Environmental, Social, Governance (ESG), що надає експертні знання в галузі глобальної безпеки, сталого розвитку та соціальної відповідальності. Опитувальник для цієї інспекції – RightShip Inspection Ship Questionnaire (RISQ).

Інститут стандартів транспортування небезпечних хімічних речовин – CDI (Chemical Distribution Institute) – незалежна організація, що інспектує химовози та газовози на відповідність існуючим міжнародним правилам, кодексам, промисловим і виробничим стандартам, що застосовуються до спеціалізованих суден.

Клуби взаємного страхування (P&I Club) – це організації взаємного морського страхування, створені судновласниками для покриття відповідальності, що може виникнути у процесі експлуатації суден. Вони надають членам страхове покриття, керують ризиками та пропонують послуги через глобальні мережі кореспондентів. Найбільші клуби P&I об'єднуються у Міжнародну групу клубів взаємного страхування (International Group of P&I Clubs – IGP&I) [12].

Управління повним набором сертифікатів є складним нормативно-правовим та логістичним завданням, а його неефективне виконання може призвести до неминучих затримок, затримань, додаткових портових зборів та величезних штрафів. Команди нагляду в компаніях з управління судами можуть запобігти цьому, уважно стежачи за сертифікатами судів. Вони розуміють час, необхідний для отримання різних схвалень, що дозволяє їм вчасно подавати заявки та забезпечувати дійсність усіх сертифікатів, необхідних для роботи у певному регіоні.

Докування. Успішне планування необхідних робіт, які виконуються в сухому доці займає кілька місяців і має враховувати такі фактори, як бюджет, потреби в ремонті, розмір, вік та стан судна. Мета - виконати всі необхідні ремонтні роботи за оптимальною вартістю. Компанії з управління судами можуть забезпечити систематичне планування та безперебійну реалізацію плану з докування, не виходячи за межі виділеного бюджету.

Закупівля. Закупівлі – це закупівля та постачання товарів, які запитуються екіпажем судна. Щоб судно працювало без затримок, закупівлі мають здійснюватися своєчасно, у межах бюджету та з дотриманням рекомендованої якості. Логістика може стати серйозною проблемою, коли важкі або обмежені за обсягом вантажі (батареї, медичне обладнання тощо) необхідно

перевезти на великі відстані в найкоротші терміни, дотримуючись місцевих і міжнародних правил. Також сюди входить своєчасне постачання різних технічних витратних матеріалів, таких як кріпильні вироби (болти, гайки, шайби), пиломатеріали, зварювальні прутки, сталеві щітки, гази, відрізи та шліфувальні диски тощо.

Документація. Підтримка актуальної документації на борту необхідна для запобігання затримкам і аварійним випадкам. Судну потрібна безліч дозволів та відповідних сертифікатів від держави прапора, класифікаційного товариства, страхової компанії, MLC тощо. MLC 2006 – Конвенція про працю в морському судноплавстві (Maritime Labour Convention) – важливий міжнародний документ, який встановлює стандарти трудових прав для моряків [13].

Для плавання в певних країнах, таких як США або Австралія, судну можуть знадобитися додаткові дозволи від місцевих органів влади, таких Берегова охорона США – United States Coast Guard (USCG) та Австралійська морська служба – Australian Maritime Safety Authority (AMSA).

Для суден, критично важливе обладнання безпеки, експлуатації та запобігання забрудненню, таке як аварійний радіобуй Emergency Position-Indicating Radio Beacon – EPIRB), реєстратор даних рейсу (Search and Rescue Transponder - SART), сепаратор масляної води тощо.

Аварійний радіобуй EPIRB, що вказує положення – це морський аварійний буй, який сповіщає пошуково-рятувальні служби про судно, що зазнає лиха, передаючи кодований сигнал на супутники. Цей сигнал містить місцезнаходження буя, що допомагає рятувальникам точно визначити місцезнаходження судна для швидкого реагування.

Пошуково-рятувальний транспондер (SART) – це портативний, водонепроникний пристрій, який допомагає у пошуку суден, що зазнали лиха, або рятувальних засобів у морі. Існує два основних типи: SART на основі радара, які надсилають характерний сигнал-відповідь на дисплеї радара X-діапазону, та AIS-SART, які передають дані про місцезнаходження через Автоматичну ідентифікаційну систему. SART активуються вручну та забезпечують сильний, активний зворотний сигнал, щоб скерувати рятувальників до місця знаходження тих, хто вижив.

Все обладнання повинно мати сертифікати схвалення та регулярного обслуговування. Навіть якщо частина обладнання знаходиться в ідеальному стані, вона не має статусу без відповідного сертифікату.

Система управління безпекою. Аварії, інциденти та небезпечні ситуації наражають на ризик життя, судно та навколишнє середовище. Міжнародний кодекс управління безпекою – The International safety management code (ISM code), випущений ІМО, описує СУБ як «структуровану та документовану систему, що дозволяє персоналу компанії ефективно реалізовувати політику компанії у сфері безпеки та захисту навколишнього середовища». Кодекс ґрунтується на спільних принципах і цілях, які включають оцінку всіх виявлених ризиків для суден, персоналу та навколишнього середовища однієї компанії, а також встановлення відповідних заходів безпеки.

Вказані технічні послуги відіграють вирішальну роль у підтримці працездатності та ефективності суден та обладнання. Ці послуги допомагають запобігти механічним поломкам, відмовам суднового обладнання, забезпечити дотримання правил і збільшити термін служби морських активів. Без ефективної технічної підтримки морські операції можуть зіткнутися зі значними збоями, що призведе до дорогих затримок та потенційних загроз безпеці.

Висновки. Спеціалізовані комп'ютерні платформи планової структури управління ТО судна підвищують продуктивність, скорочують витрати і дозволяють більш ефективно використовувати важливу інформацію стосовно стану обладнання, планів виконання робіт, прогностичного обслуговування, іншими робочими процедурами тощо. Існуючі і перспективні комплекси дають можливість ефективно керувати ієрархією компонентів, централізованими робочими процедурами та іншими модулями суднових процесів.

Список літератури

- [1] The International Safety Management (ISM) Code [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/ismcode.aspx>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [2] 7 Services in Technical Ship Management (and How to Choose the Right Company) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nautilusshipping.com/news-and-insights/technical-ship-management>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [3] Maritime Safety Innovation Lab LLC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://maritimesafetyinnovationlab.org>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [4] Planned maintenance system for technical ship management - ShipManager Technical [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dnv.com/services/planned-maintenance-system-for-technical-ship-management-shipmanager-technical-1509/>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [5] Planned Maintenance System for Ships (PMS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sbntech.com/software/planned-maintenance-system-for-ships-pms/>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [6] Your shipping business. One suite of tools. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://shipnet.no/?_gl=1*rdbwjw*up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=CjwKCAjw89jGBhB0EiwA2o1On3dHMxrWj4aGtqGDUFur9CSlqS2VMjk5rLmvmqt7B_RmfneuHTMB2hoCldwQAvD_BwE&gbraid=0AAAAAovsGLbVZXIGiYnQP9M2EwTAE5Wh9. (дата звернення: 06.10.2025).
- [7] Technical Services in Marine Operations: What You Need to Know [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pacifictug.com/technical-services-in-marine-operations/>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [8] Ship Management Solutions and Technical Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fleetship.com/services/ship-management>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [9] Welcome to OCIMF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ocimf.org/>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [10] Maximise Safety with Detailed Vessel Inspections [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rightship.com/solutions/shipowner/vessel-inspections>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [11] RightShip's Inspection Ship Questionnaire (RISQ) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rightship.com/solutions/shipowner/rightship-inspection-ship-questionnaire-risq>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [12] Project Management & Marine power plants maintenance and repair [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ciss-group.com/service/shipping/marine-power-plants-maintenance-and-repair/>. (дата звернення: 06.10.2025).
- [13] Maritime Labour Convention, 2006 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ilo.org/international-labour-standards/maritime-labour-convention-2006>. (дата звернення: 06.10.2025).

Jurii Kisetov, Bohdan Lychko

Features of modern systems of planned technical maintenance of Ship Power Plants

Modern approaches to building scheduled maintenance systems for ship equipment, software features of such systems used by leading ship management companies, are analyzed.

Keywords: (maintenance, technical management, planned maintenance systems, software).

UDC 656.61:005

MODERN APPROACHES TO THE TECHNICAL MANAGEMENT OF SHIPPING COMPANIES' FLEETS

O. Akimov, Cand. Sc., assoc. prof. ¹,

Ya. Nahrybelnyi, Dr. Sc., Professor ²

Kherson State Maritime Academy

Ukraine, Odesa

¹akimoffsasha@gmail.com, ²yar150371@gmail.com

Abstract. The paper examines contemporary approaches to the technical management of shipping companies' fleets in the context of rapid digital transformation and environmental challenges. The study identifies key trends including the integration of data analytics, artificial intelligence, cloud platforms, Internet of Things (IoT) solutions, and sustainability-oriented strategies. Special attention is given to predictive maintenance (PdM), optimization of operational processes, and regulatory requirements such as IMO EEXI and CII. The article also outlines practical recommendations for implementing data-driven fleet management, enhancing cybersecurity, and restructuring technical departments.

Keywords: technical management, fleet management, predictive maintenance, maritime digitalization, sustainability, decarbonization, cloud platforms, artificial intelligence, IoT.

1. Introduction. During 2024–2025, the technical management of shipping companies' fleets has undergone substantial transformation. Digitalization, data analytics, real-time connectivity, cloud-based solutions, and increasing environmental performance requirements are shaping a new paradigm of technical asset management.

Therefore, it is necessary to analyze the key trends, implementation practices, and strategic recommendations aimed at achieving efficient fleet management in modern operational conditions.

2. Data Analytics, Artificial Intelligence, and Operational Optimization

2.1 Predictive Maintenance (PdM). Predictive maintenance utilizes AI algorithms to analyze data from shipboard sensors, enabling early detection of failures, proactive repair planning, and reduction of unplanned downtime.

2.2 Route and Operational Optimization. Modern decision-support systems integrate meteorological, hydrodynamic, port congestion, and fuel consumption data. Optimization algorithms reduce voyage duration and energy consumption, improving cost-efficiency and environmental performance.

2.3 From Data to Decision-Making. Shipping companies are transitioning from passive data collection to data-driven management. Interactive dashboards, key performance indicators (KPIs), and automated alerts provide actionable insights for both technical and operational teams.

3. Digitalization, Cloud Platforms, and Real-Time Connectivity

3.1 Cloud-Based SaaS Platforms. The global fleet management software market is expanding rapidly, estimated at USD 821.37 million in 2024 with an annual growth rate of 9–11% or more [1]. This demonstrates the trend toward cloud-based models that ensure data accessibility and analytical capabilities from any location [2].

3.2 Real-Time and Mobile Communication. Mobile applications and smart dashboards for crews and shore-based teams enhance communication efficiency, accelerate event response, and support effective maintenance planning.

3.3 Integration of IoT and Telemetry. A reliable data collection infrastructure—comprising sensors, gateways, telemetry, and cloud integration—is now a foundational component supporting PdM and fleet analytics.

4. Sustainability, Environmental Requirements, and Decarbonization

4.1 Regulatory Frameworks: IMO EEXI and CII. Since 1 January 2023, the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and the Carbon Intensity Indicator (CII) have been enforced by the International Maritime Organization (IMO) [3]. Compliance with these metrics is now integral to technical management [4, 5].

4.2 European and Regional Initiatives. The FuelEU Maritime Regulation, effective from 1 January 2025, imposes stricter environmental obligations on EU-based operations [6]. Companies must adapt their fuel structures and prepare for broader decarbonization measures.

4.3 Alternative Fuels and Energy Efficiency. Shipowners are exploring vessel retrofitting, engine modernization, and the adoption of alternative fuels such as LNG and ammonia. These transitions are now core elements of sustainable technical management.

5. Practical and Organizational Transformations in Technical Management

5.1 Shift in Maintenance Strategies. The industry is moving from rigid calendar-based maintenance to hybrid approaches, prioritizing PdM as the main framework supported by planned maintenance cycles.

5.2 Automation of Reporting and Compliance. Automated systems for data gathering and environmental reporting (fuel, CO₂, KPIs) streamline interactions with regulators and stakeholders.

5.3 ROI-Based Green Investments. Not all vessels undergo equal modernization; investment decisions are based on ROI analysis, vessel age, operational profile, and available bunkering infrastructure.

6. Human Resource Development and Organizational Adaptation

6.1 Training and Upskilling. As new technologies become standard, continuous professional development for crews and shore-based staff is essential to maintain operational safety and efficiency.

6.2 Emergence of New Professional Roles. Technical departments are expanding to include specialists in data analytics, IoT systems, and energy management. The shift toward remote monitoring and digital operations necessitates flexible, interdisciplinary structures.

6.3 HR Strategies for Attraction and Retention. In response to workforce shortages, companies invest in internship programs, competitive compensation, and supportive corporate culture to strengthen retention.

7. Risks and Barriers

✓ **Legacy system integration:** older vessels without telemetry remain outside digital transformation scope.

✓ **Cybersecurity vulnerabilities:** increasing digitalization demands stricter network protection and data access control.

✓ **Capital intensity:** retrofitting for alternative fuels requires high CAPEX and clear ROI justification.

✓ **Regulatory uncertainty:** inconsistent policy timelines hinder long-term investment planning.

8. Recommendations

1. **Assess data infrastructure:** inventory existing sensors and monitoring systems; identify data gaps and plan sensor deployment.

2. **Implement PdM pilot projects:** select high-priority vessels and evaluate the impact on downtime, reliability, and costs.

3. **Adopt a cloud management system:** centralize technical operations, spare parts management, and compliance reporting.

4. **Evaluate CAPEX for “green readiness”:** conduct ROI and TCO analyses for modernization projects.

5. **Enhance cybersecurity and training:** develop cybersecurity policies and conduct staff training on digital tools and alternative fuels.

6. **Restructure the organization:** create multidisciplinary teams integrating (*marine engineers + data engineers + compliance officers*).

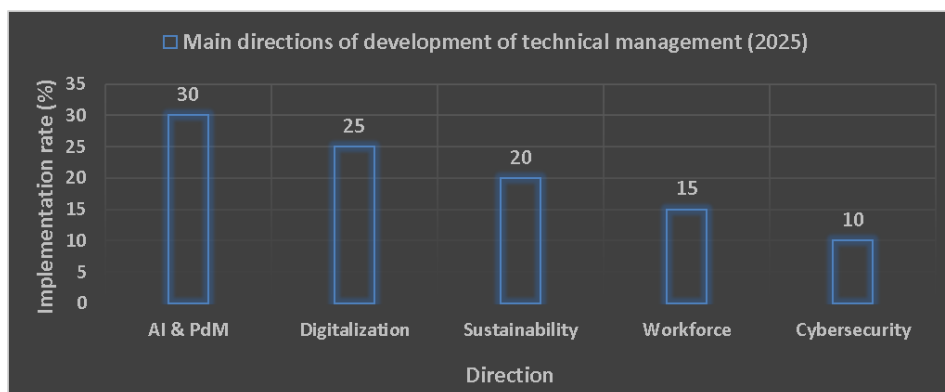


Figure 1 – Main directions of development of technical management (2025)

Conclusion. Contemporary fleet technical management has evolved into a complex, multidimensional discipline that integrates digitalization, analytics, sustainability, and human factors. Companies capable of effectively combining data-driven management + digital platforms + efficient organizational structures + environmental responsibility will secure a sustainable competitive advantage in 2025 and beyond.

References

1. Global Fleet Management Software Market Report (2024). Marine Fleet Management Software Market By Deployment (Premise-Based Deployment, Cloud Deployment), End-User (Ports & Terminals, Shipping Industries), & Region for 2024-2031 / Report ID: 246431 / 202 pages.
2. Marine Management Software Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2025-2030) (<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/marine-management-software-market>).
3. Short-term GHG reduction measure (<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/short-term-ghg-reduction-measure.aspx>).
4. IMO GHG regulations to squeeze Dry Bulk supply (<https://www.drewry.co.uk/maritime-research-opinion-browser/maritime-research-opinions/imo-ghg-regulations-to-squeeze-dry-bulk-supply>).
5. Carbon Intensity Indicator (CII): Development & verification of SEEMP Part III (<https://www.classnk.or.jp/HP/en/activities/statutory/seemp/index.html>).
6. Commission Staff Working Document / Union submission to the 82nd session of the International Maritime Organization's Marine Environment Protection Committee on a possible way forward on the review of the CII (<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-11543-2024-INIT/en/pdf>).

Modern Approaches to the Technical Management of Shipping Companies' Fleets

Oleksandr Akimov, Yaroslav Nahrybelnyi

The paper examines contemporary approaches to the technical management of shipping companies' fleets in the context of rapid digital transformation and environmental challenges. The study identifies key trends including the integration of data analytics, artificial intelligence, cloud platforms, Internet of Things (IoT) solutions, and sustainability-oriented strategies. Special attention is given to predictive maintenance (PdM), optimization of operational processes, and regulatory requirements such as IMO EEXI and CII. The article also outlines practical recommendations for implementing data-driven fleet management, enhancing cybersecurity, and restructuring technical departments.

Keywords: technical management, fleet management, predictive maintenance, maritime digitalization, sustainability, decarbonization, cloud platforms, artificial intelligence, IoT.

Сучасні підходи до технічного менеджменту флоту судноплавних компаній

Акімов О.В., Нагрибельний Я.А.

Розглянуто сучасні підходи до технічного менеджменту флоту судноплавних компаній в умовах цифрової трансформації та зростання екологічних вимог. Визначено ключові тенденції, такі як впровадження прогностичного технічного обслуговування, штучного інтелекту, хмарних платформ для управління флотом та стратегій сталого розвитку. Особливу увагу приділено відповідності вимогам ІМО (ЕЕХІ, СІІ) і ролі людського ресурсу у нових організаційних моделях. Подано практичні рекомендації щодо інтеграції цифрових інструментів, аналітики даних і екологічно орієнтованого управління.

Ключові слова: технічний менеджмент, управління флотом, прогностичне технічне обслуговування, цифровізація, сталий розвиток, декарбонізація, штучний інтелект, ІоТ, хмарні платформи.

Секція № 2. УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕМЕНТАХ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

УДК 621.45.034

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СЛАБКОСТРУМОВОГО ПЛАЗМОВОГО ІНТЕНСИФІКАТОРА В СИСТЕМІ ДВОПАЛИВНОЇ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД

А. В. Козловський¹, Б. Т. Діасамідзе²

¹канд. техн. наук, доцент кафедри турбін,

²PhD, викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та
теплоенергетики

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна

¹artem.kozlovskiy@nuos.edu.ua, ²badri.diasamidze@nuos.edu.ua

Анотація. У роботі подано результати експериментальних досліджень слабкострумowego плазмowego інтенсифікатора, призначеного для використання в двопаливних камерах згоряння газотурбінних двигунів. Досліджено вольт-амперні характеристики плазмотрона при варіюванні витратами плазмоутворюючого та розпилювального повітря, а також при введенні рідкої фази, що імітує паливо. Встановлено особливості формування стабільного факела плазми та визначено діапазон стійкої роботи генератора. Показано перспективність використання плазмових інтенсифікаторів для підвищення надійності та ефективності роботи сучасних газотурбінних установок.

Ключові слова: газотурбінний двигун, двопаливна камера згоряння, плазмовий інтенсифікатор, стабільність горіння, експериментальні дослідження.

Вступ. Сучасний розвиток енергетичного машинобудування визначається тенденціями до підвищення ефективності та екологічності газотурбінних двигунів (ГТД), які широко застосовуються в авіаційній, судновій та енергетичній галузях [1–4]. Важливим завданням є вдосконалення процесів згоряння палива, зокрема у двопаливних камерах, що працюють як на рідких, так і на газоподібних видах палива [5]. Використання плазмових технологій відкриває нові можливості для інтенсифікації процесів займання, стабілізації полум'я та зниження емісії шкідливих речовин [6].

Актуальність даних досліджень зумовлена необхідністю створення високоефективних і надійних енергетичних установок нового покоління, які відповідатимуть вимогам щодо універсальності застосування та зменшення екологічного навантаження.

Постановка задачі та мета роботи. Одним із перспективних напрямів розвитку двопаливних камер згоряння є застосування низькотемпературної плазми, що формується в слабкострумowych плазмотронах. Проте для практичного впровадження таких систем необхідно

експериментально визначити їхні робочі характеристики, дослідити вплив параметрів живлення і подачі робочих середовищ на стабільність горіння дуги.

Метою роботи є експериментальне визначення вольт-амперних та енергетичних характеристик слабкострумowego плазмowego інтенсифікатора при його роботі з повітрям як плазмоутворюючим середовищем та з подачею рідкої фази, що імітує паливо.

Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

- дослідити вольт-амперні характеристики плазмотрону при різних витратах плазмоутворюючого та розпилювального повітря;
- оцінити вплив введення рідкої фази на процес пробую дуги та зону стабільної роботи;
- визначити діапазон стійкого функціонування генератора для подальшого використання у двопаливних камерах згоряння.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети створено експериментальну установку, до складу якої входив слабкострумний плазмотрон постійного струму, система подачі повітря й води, блок живлення та вимірювальні прилади. Під час експериментів здійснювалося регулювання витрати плазмоутворюючого повітря, додаткового розпилювального повітря та рідини. Використовувалися як прямі методи вимірювання (сила струму, напруга, витрати), так і опосередковані (зважування, візуальні спостереження факела).

Особлива увага приділялася визначенню області стабільного горіння електричної дуги, що має ключове значення для роботи плазмowego інтенсифікатора у складі камери згоряння.

Основні результати. Отримані вольт-амперні характеристики генератора свідчать про крутопадаючий характер залежності напруги від струму за всіх режимів роботи. Установлено, що зі збільшенням витрати плазмоутворюючого повітря зростає довжина та потужність електричної дуги.

При введенні додаткового розпилювального повітря і води, яка імітувала рідке паливо, напруга пробую дуги зростала пропорційно до витрат середовищ, а зона стабільного горіння розширювалася з 0,1–0,9 А до 0,3–0,9 А. Максимальне значення робочої напруги досягало 1,3 кВ.

Слід відзначити, що при постійному значенні витрати води, зміни параметрів, а саме, плазмоутворювального повітря та розпилювального повітря, обмежувалися діапазоном стійкої роботи плазмотрона та потужністю джерела живлення. При витраті води 2,75 г/с, напруга пробую дуги зростала від 0,5 до 1,3 кВ, відповідно при струмі 0,1–0,3 А (рис. 1). Зростання напруги пробую зі збільшенням витрати води та розпилювального повітря може бути пояснене підвищенням тиску в системі каналів перерізу та на вихідному соплі під час змішування відповідних робочих середовищ. Цей фактор необхідно враховувати під час проєктування джерел живлення для плазмотрона, призначеного для роботи як стабілізуючий елемент у процесах спалювання рідкого палива в камерах згоряння газотурбінних двигунів.

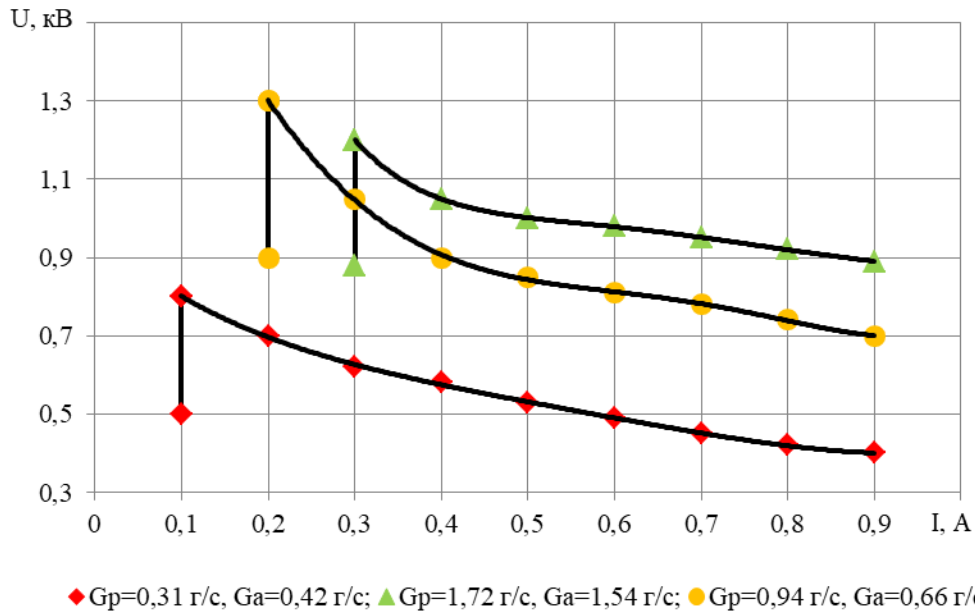


Рисунок 1 – Вольт-амперні характеристики плазмового інтенсифікатора при різних витратах плазмоутворюючого G_p та розпилюючого G_a повітря та подачею води $G_w = 2,75$ г/с

Встановлено, що стійке функціонування плазмового інтенсифікатора забезпечується в межах струмів 0,1–0,9 А за витрати плазмоутворюючого повітря до 1,6 г/с. При подачі розпилювального повітря нижня межа робочого струму підвищувалася до 0,3 А.

Візуальні спостереження підтвердили формування стійкого плазмового факела з рівномірним розподілом і достатньою довжиною для ефективного займання паливно-повітряної суміші.

Експериментальні дослідження підтвердили перспективність використання плазмових інтенсифікаторів у двопаливних камерах згоряння. Крутопадаючий характер вольт-амперних характеристик свідчить про стабільність роботи плазмотрона, а вплив додаткових агентів дозволяє регулювати межі робочої зони.

Практична значимість роботи полягає у можливості вдосконалення конструкцій камер згоряння для забезпечення їхньої ефективної роботи при переході між видами палива, а також у зниженні емісії та підвищенні надійності запуску ГТД.

Висновки. 1. Розроблено та випробувано слабкострумовий плазмовий інтенсифікатор, призначений для застосування в двопаливних камерах згоряння ГТД. 2. Отримано вольт-амперні характеристики генератора за різних витрат плазмоутворюючого та розпилювального повітря і рідини. У всіх випадках спостерігався крутопадаючий характер залежностей. 3. Визначено діапазон стабільного горіння дуги: 0,1–0,9 А при подачі лише плазмоутворюючого повітря та 0,3–0,9 А при додатковому введенні повітря і води. 4. При витраті води 2,75 г/с, напруга пробую дуги зростала від 0,5 до 1,3 кВ, відповідно при струмі 0,1–0,3 А. 5. Результати можуть бути

використані для удосконалення конструкцій камер згоряння, що працюють на рідкому і газоподібному паливі, а також для створення ефективних систем плазмової підтримки займання.

Література:

- [1] Serbin, S., Kozlovskyi, A., & Burunsuz, K. (2023). Influence of plasma-chemical products on process stability in a low-emission gas turbine combustion chamber. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 40(2), 203–213. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0046>.
- [2] Serbin, S. I., Kozlovskyi, A. V., & Burunsuz, K. S. (2016). Investigations of nonstationary processes in low emissive gas turbine combustor with plasma assistance. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(12), 2960–2964. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2620983>.
- [3] Сербін, С. І., & Козловський А. В. (2021). Підвищення стійкості низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 4(487), 7–13. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).2](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).2)
- [4] Сербін, С. І., & Козловський А. В. (2025). Вибір моделі турбулентності для числового аналізу нестационарних процесів в газотурбінних камерах згоряння. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 2(500), 111–118. [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).16](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).16)
- [5] Сербін, С. І., & Козловський А. В., Вілкул С. В., & Діасамідзе Б.Т. (2025). Експериментальні дослідження енергетичних характеристик плазмохімічного інтенсифікатора. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*, 1(499), 76–82. [https://doi.org/10.15589/znp2025.1\(499\).11](https://doi.org/10.15589/znp2025.1(499).11)
- [6] Сербін, С. І., & Козловський А. В., Вілкул С. В., & Діасамідзе Б.Т. (2025). Експериментальні дослідження плазмового інтенсифікатора для двопаливної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія. Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»*, 3(203), 40–48. <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.3.04>

Experimental investigations of a low-current plasma intensifier in the system of a dual-fuel gas turbine combustion chamber

Kozlovskyi A., Diasamidze B.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Abstract. The paper presents the results of experimental investigations of a low-current plasma intensifier intended for application in dual-fuel gas turbine combustion chambers. The volt-ampere characteristics of the plasma torch were obtained under varying air and liquid supply conditions. It was established that the arc discharge demonstrates a falling voltage-current dependence, while the introduction of atomizing air and water increases the arc breakdown voltage and extends the stable operating range. The results confirm the feasibility of plasma-assisted technologies to improve ignition reliability, combustion stability, and efficiency of modern dual-fuel gas turbine engines.

Keywords: gas turbine engine, dual-fuel combustion chamber, plasma intensifier, combustion stability, experimental studies.

УДК 621.431

**ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЧИСЛОВИХ ПРОФІЛІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ
ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ У pV -КООРДИНАТАХ****О. А. Єкушенко, магістр¹; М. С. Завадський, магістр¹; Д. С. Крикуненко, магістр¹; С. С. Ліщенко, магістр¹; Є. В. Білоусов, д. т. н., проф.²**¹ Первомайський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування; ² Одеський національний морський університет

Анотація. Розглянуто принципи представлення числових профілів робочого процесу двигуна у pV -координатах, шляхом його перебудови з $p\phi$ -координат, для використання у вирішенні діагностичних задач.

Ключові слова: числовий профіль; робочий процес; індикаторна діаграма; числовий масив

Вступна частина. Використання числових профілів робочого процесу сучасного суднового двигуна є ефективним інструментом для контролю його робочих параметрів під час експлуатації особливо на режимах часткових навантажень [1]. Найбільш актуальним створення цифрових профілів є для малообертових двигунів, у яких в залежності від його комплектації допоміжними агрегатами (тип турбокомпресору, паливних насосів, форсунок та їх розпилювачів) параметри робочого процесу можуть суттєво відрізнятися [2]. Запропонована у роботі [3, 4] методика побудови числових профілів по результатам стендових випробувань двигуна дозволяє врахувати такі особливості робочого процесу. Запропонована технологія побудови профілю заснована на обробці числового масиву як неперервної функції, що призводить до представлення результатів обробки у вигляді поверхні, що є функцією кута повороту колінчастого валу двигуна. Однак дуже часто для практичного застосування більш зручним є представлення робочого процесу у координатах тиск-об'єм (pV -координатах). Така форма представлення більш зручна для визначення цілого ряду показників робочого процесу пов'язаних з роботою циклу. Тому є потреба у переведенні числових профілів робочого процесу з $p\phi$ - до pV -координат.

Мета публікації – викласти основні положення методики переведення числових профілів з $p\phi$ - до pV -координат.

Викладення основного матеріалу. Числовий профіль робочого процесу представляє собою тривимірну діаграму яка наочно демонструє змину тиску у робочому циліндрі по куту обертання колінчастого валу при різних навантаженнях двигуна (рис. 1). Основне призначення числового профілю – можливість отримання розрахункових еталонних діаграм робочого процесу на будь якому режимі роботи двигуна [5]. Це може бути зроблено шляхом перетину профілю площиною паралельною координатній площини $p\phi$, для відповідного значення навантаження. Приклад отримання еталонної розрахункової індикаторної діаграми для режиму роботи на навантаженні 65 % від MCR наведено на рис. 1.

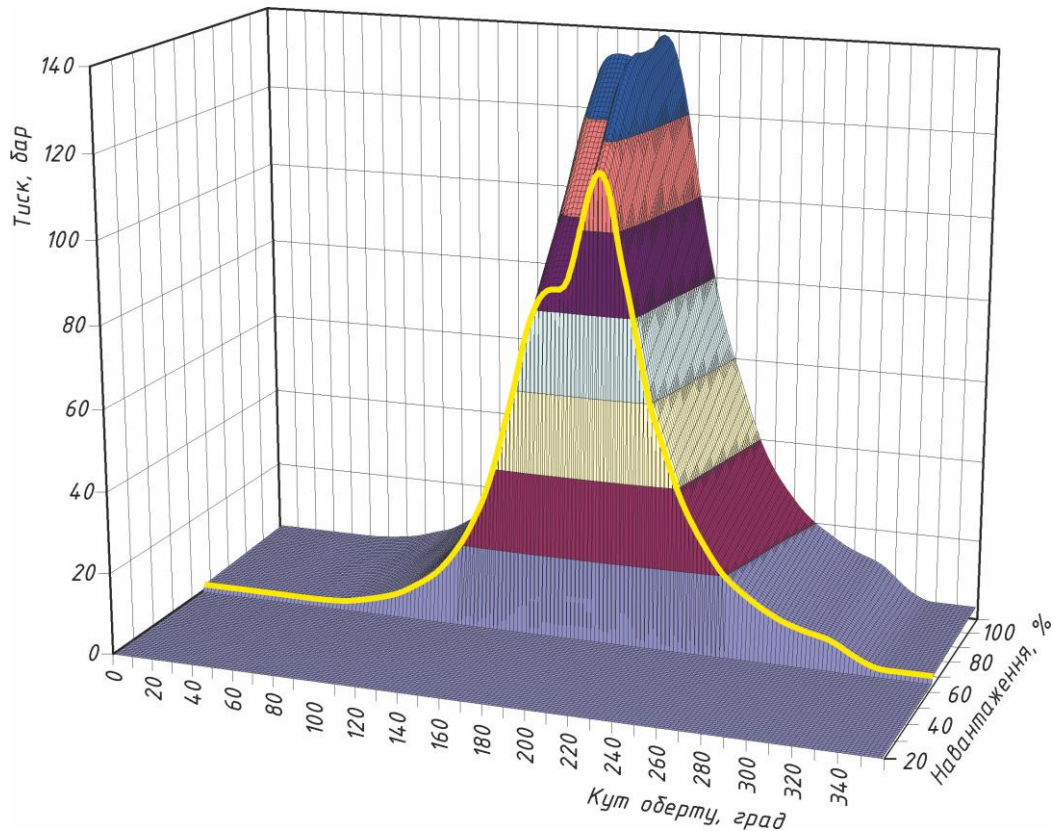


Рис. 1 – Приклад числового профілю робочого процесу двотактного двигуна з виділенням розрахункової діаграми для навантаження 65 % від MCR

Особлива актуальність визначення еталонних індикаторних діаграм пов'язана з тенденцією зменшення швидкостей комерційного руху суден та появою двигунів, що працюють на альтернативних паливах, зокрема на природному або нафтовому газах [5–8]. Робочий процес таких двигунів може суттєво відрізнитися від робочого процесу двигунів, що працюють на номінальних режимах або на традиційних паливах [7, 8]. Для ефективного визначення стану таких двигунів механіки на судні повинні мати об'єктивну порівняльну базу, яка, найчастіше подається у вигляді індикаторних діаграм робочого процесу, і, в першу чергу, у вигляді pV -діаграм.

Основною проблемою при перебудові з кутових діаграм в об'ємні і навпаки, є невідповідність значень тиску, значенням об'єму при обох цих способах представлення діаграм [9].

Оскільки, отримання діаграм у pV -координатах необхідно для вирішення задач визначення показників робочого процесу під час експлуатації судна, метод перебудови повинен бути зрозумілим широкому колу суднових механіків. До того ж, він не повинен потребувати для своєї реалізації спеціалізованих розрахункових програмних пакетів, окрім тих, які традиційно використовуються персоналом машинної команди.

Виходячи з цього, було запропоновано використовувати метод порівняння об'ємів що відповідають двом типам представлення діаграм, з визначенням відповідності конкретного значення тиску заздалегідь визначеному діапазону зміни об'єму. Для реалізації такого підходу підійде будь яка пакетна програма, здатна працювати з числовими масивами і найпоширенішими операторами логіки. Процедура полягає у порівнянні діапазонів об'єму визначених для діаграм обох типів, і якщо ці діапазони перекриваються, значення тиску переноситься до нового масиву, якщо вони не співпадають, переноситься нульове значення. Таким чином відбувається формування нового масиву, що відповідає новому типу представлення. Оскільки отримане при перенесенні значення тиску відповідає діапазону а не конкретному значенню об'єму, точність даного метода суттєво залежить від величини дискретного відрізка.

Проведені нами розрахунки показали, що для практичного використання цілком достатнім є розбиття об'єму на ділянки $0,5^\circ$ для кутового представлення діаграми і $1/360$ робочого об'єму при представленні у pV -координатах. Приклад числового профілю перебудованого у pV -координати наведено на рис. 2.

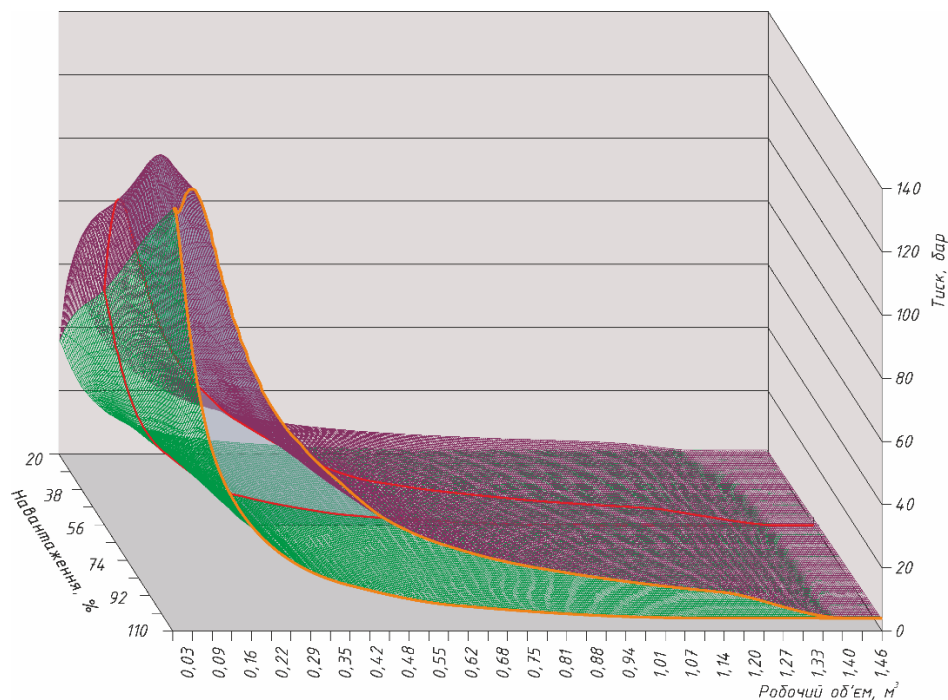


Рис. 2 – Приклад числового профілю робочого процесу двотактного двигуна перебудованого у pV -координати з виділенням розрахункової діаграми для навантаження 65 % від MCR

Висновки. Числові профілі робочого процесу є зручним і ефективним інструментом оцінки технічного стану двигуна, особливо в умовах коли отримання індикаторних діаграм, що відповідають номінальним режимам роботи неможливо або утруднено. Відносна простота представлення числових профілів у більш інформативному вигляді, а саме у pV -координатах

суттєво розширює діапазон їх використання судновими механіками під час експлуатації двигунів.

Список літератури

[1] Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. / Білоусов Є.В., Марченко А.П., Рибальченко М.Є., Савчук В.П., Тулущенко Г.Я.: Двигуни внутрішнього згорання – Харків: вид. НТУ «ХПІ» – 2022. – № 1. – С 51-59. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.07

[2] Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна на режимах часткових навантажень. Розвиток Транспорту № 3(14), 2022. – С. 97-109.

[3] Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating. / Belousov, E., Marchenko, A., Rybalchenko, M., Tuluchenko, G., Gritsuk I. Savchuk V., Volodarets M., // SAE Technical Paper 2023-01-5008, 2023, doi:10.4271/2023-01-5008.

[4] Обробка індикаторних діаграм у задачах побудови цифрових профілів робочого процесу суднових двигунів. / М.Є. Рибальченко, Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, В.П. Савчук, В.П. Будко // Двигун внутрішнього згорання – Харків: вид. НТУ «ХПІ» – 2023. – № 1. – С 33-41. doi: 10.20998/0419-8719.2023.1.05

[5] Рибальченко М.Є., Білоусов Є.В. Використання числових профілів робочого процесу для аналізу ефективності роботи суднового малооборотного двигуна в умовах сучасної тенденції щодо зниження експлуатаційної швидкості суден. Водний транспорт. Збірник наукових праць ДУІТ. – К.: ДУІТ, 2022. – Випуск 2(36). – С. 71-83. doi:10.33298/2226-8553.2022.2.36.06

[6] Sartini N. More haste less speed. Container ship focus. Lloyd's Register, September 2008 Issue 5. – P. 3.

[7] Белоусов Е.В. Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления. / Варбанец Р.А, Савчук В.П., Грицук И.В., Вербовский В.С. // Двигатели внутреннего сгорания – Харьков: изд. НТУ«ХПИ» – 2019. – № 1. – С 27-33. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.1.05

[8] Организация внутреннего смесеобразования в судовых малооборотных газодизельных двигателях. / Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, И.В. Грицук, Т.П. Белоусова: Двигатели внутреннего сгорания // Научно-технический журнал. Харьков: НТУ (ХПИ). – 2017. – №2. – 68 с., с. 13-16.

[9] Аналітичний опис індикаторних діаграм. / Білоусов Є.В., Тулущенко Г.Я., Савчук В.П. // Розвиток транспорту. Науковий журнал. № 1(8), Видавничий дім «Гельветика» 2021. С. 47-61 ISSN 2616-7360

Yekushenko O.; Zavadsky M.; Krykunenko D.; Lishchenko S.; Bilousov I.

Representation of numerical profiles of the working process of internal combustion engines in pV -coordinates

Abstract. The principles of representing numerical profiles of the working process of the engine in pV -coordinates, by its reconstruction from $p\varphi$ -coordinates, for use in solving diagnostic problems are considered.

Keywords: numerical profile; working process; indicator diagram; numerical array

UDC 629.5

IMPROVING WORKFLOWS IN SHIP PROPULSION SYSTEM ELEMENTS: CHALLENGES AND PROSPECTS

Weixing Liu, associate professor¹, *Wanting Hu*, graduate student²,

Valerii Kuznetsov, Doctor of Science (tech.), professor³

¹*Makarov College of Marine Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang JiangSu, China, lwxiou_ship@126.com*

²*Makarov College of Marine Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang JiangSu, China, hwtvantine@foxmail.com*

³*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, Mykolaiv, valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua*

Abstract. *Ship propulsion systems are at the center of efforts to reduce fuel consumption, improve operational reliability, and achieve international decarbonization targets. This paper reviews the improvement of workflows in propulsion system elements, focusing on digital integration, predictive maintenance, hybrid propulsion, and crew interaction. The findings suggest that workflow enhancement not only increases system efficiency but also ensures compliance with IMO environmental regulations. Future directions include the integration of artificial intelligence and cross-system interoperability.*

Keywords: *ship propulsion; workflow optimization; digital integration; predictive maintenance; hybrid systems.*

Introduction. The maritime industry is facing unprecedented challenges caused by stricter emission regulations, volatile fuel prices, and the global push toward sustainable transport. Propulsion systems, which include the main engine, shafting, gearbox, and auxiliary machinery, form the heart of ship operations. The workflows that govern their operation, maintenance, and management directly determine overall ship performance [1]. Historically, propulsion workflows have relied heavily on fixed maintenance schedules, manual monitoring, and reactive repairs. While these practices ensured a basic level of reliability, they often resulted in inefficiency, excessive downtime, and avoidable fuel consumption [2]. As international regulations, such as the IMO greenhouse gas (GHG) reduction strategy, demand significant efficiency improvements, propulsion workflows must be redesigned to accommodate digitalization, predictive diagnostics, and hybrid power integration [3, 4]. The aim of this paper is to review contemporary approaches to workflow improvement in propulsion system elements, highlight best practices, and discuss the main challenges and opportunities for the future.

Digitalization and workflow integration. Digital twins, virtual sensors (figure 1), and data-driven models enable real-time replication of engine and shaft conditions [5, 6]. By integrating monitoring, control, and simulation into a single workflow, operators can predict failures before they occur, balance engine load more effectively, and optimize propulsion efficiency under varying sea conditions.

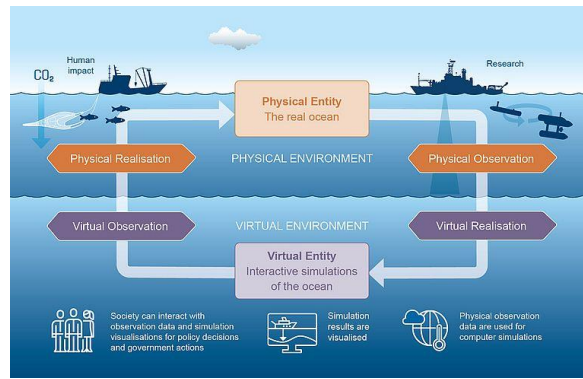


Figure 1 – Elements and interactions of a Digital Twin Ocean

Predictive and condition-based maintenance. Condition-based maintenance (CBM) allows workflows to be guided by actual machine health (figure 2), supported by vibration monitoring, oil analysis, and exhaust gas measurement [7]. Predictive maintenance (PdM) uses algorithms and machine learning to identify early indicators of failures. Research shows that predictive workflows can significantly reduce propulsion downtime while lowering lifecycle costs [8].

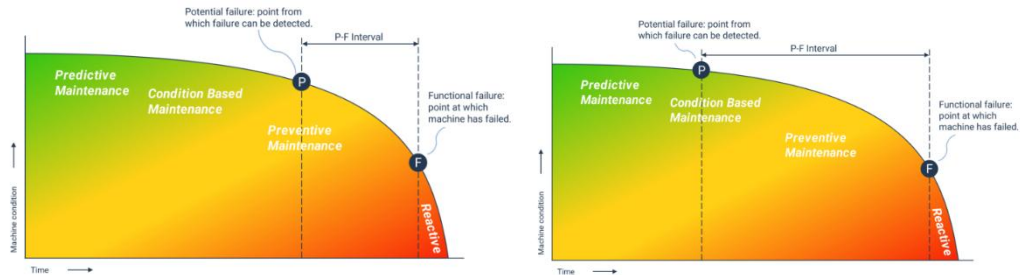


Figure 2 – Increasing the P-F interval with CBM

Hybrid energy workflows. Integration of LNG, batteries, and renewable auxiliaries requires dynamic power distribution. Effective workflows must manage transitions between power modes, balance emission reductions with fuel economy, and ensure reliability under different load conditions [9]. Case studies report that hybrid architectures with advanced control strategies can reduce fuel consumption and emissions by up to 10–35 % when optimized with advanced energy management systems [10].

Human factors and workflow training. Hybrid and digitalized propulsion systems require enhanced training and decision-support tools. Simulation-based training prepares crews to manage new workflows effectively, while semi-autonomous decision aids reduce the cognitive load on operators [11, 12].

Integration of artificial intelligence. AI applications in propulsion workflows are emerging. Machine learning and optimization algorithms can autonomously schedule maintenance, adjust propulsion settings, and reconfigure workflows in real time [13].

Conclusions. 1. Improving workflows in propulsion system elements is essential for addressing modern challenges in efficiency, reliability, and environmental performance. 2. Key directions include digital workflow integration, predictive diagnostics, hybrid energy management, and enhanced crew

interaction. 3. Future developments will emphasize AI-driven autonomy and cross-system interoperability, moving toward intelligent propulsion plants capable of self-management.

References

- [1] Stoumpos, S., Theotokatos, G., Mavrellos, C., & Lazakis, I. (2018). Numerical study of propulsion system performance during ship acceleration. *Ocean Engineering*, 153, 275-288.
- [2] Cipollini, F., Oneto, L., Coraddu, A., Murphy, A. J., & Anguita, D. (2018). Condition-based maintenance of naval propulsion systems with supervised data analysis. *Ocean Engineering*, 149, 268-278.
- [3] International Maritime Organization. (2018). *Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. MEPC 72/17/Add.1.
- [4] International Maritime Organization. (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. MEPC 80/WP.13.
- [5] Liu, C., Xu, W., Wang, C., & Jiang, P. (2020). A digital twin-driven approach for on-line controlling quality of marine diesel engine critical parts. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 235-249.
- [6] Chen, B. Q., Guedes Soares, C., & Videiro, P. (2021). Review of digital twin of ships and offshore structures. In *Developments in Maritime Technology and Engineering* (pp. 445-451). CRC Press.
- [7] Cacchiani, V., Toth, P., & Tilli, T. (2020). Condition-Based Maintenance—An Extensive Literature Review. *Processes*, 8(2), 31.
- [8] Kalafatelis, A. S., Nomikos, N., Giannopoulos, A., Alexandridis, G., Karditsa, A., & Trakadas, P. (2025). Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 425.
- [9] Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., & Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: *A review of developments*. *Applied Energy*, 194, 30-54.
- [10] Tang, W., Dickie, R., Roman, D., Robu, V., & Flynn, D. (2019). Optimisation of hybrid energy systems for maritime vessels. *Journal of Engineering*, 2019(17), 4516-4521.
- [11] Maersk Training. (2024). Sustainable Development and Simulation-based Training in Maritime. *Maersk Training News & Insights*.
- [12] Zhang, Y., Chen, X., Zhang, J., & Yin, J. (2021). Towards the Human–Machine Interaction: Strategies, Design, and Human Reliability Assessment of Crews' Response to Daily Cargo Ship Navigation Tasks. *Sustainability*, 13(15), 8173.
- [13] Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., Łobodzińska, A., & Kostecki, T. (2024). Harnessing AI for Sustainable Shipping and Green Ports: *Challenges and Opportunities*. *Applied Sciences*, 14(14), 5994.

УДК 621.436:662.756

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

О. І. Грабовенко, ст. викладач¹, С. В. Петренко, магістрант²

*Первомайський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова
м. Первомайськ, Україна*

¹oleksandr.hrabovenko@nuos.edu.ua ²petrenkoulia467@gmail.com

Анотація. Розглянуті фізико-хімічні властивості рослинних олій та визначені умови їх застосування в якості палива для дизельних двигунів малої потужності. Обґрунтовано доцільність попереднього підігріву рослинних олій та їх сумішей із дизельним паливом для покращення паливних характеристик.

Ключові слова: дизельний двигун, рослинні олії, вязкість кінематична, суміші олій та дизельного палива.

Вступна частина. В зв'язку із ростом цін на нафтопродукти та скороченням запасів нафти все більш актуальним стають роботи, направлені на використання в ДВЗ альтернативних палив.

Особливе місце серед сировинних ресурсів альтернативних рідких палив займають палива рослинного походження, що виробляються із поновлюваної сировини. Використання біопалива значно розширить сировинну базу для виробництва моторних палив, зробить її практично невичерпною. До таких біопалив відносяться і рослинні олії з фізико-хімічними властивостями, які дозволяють використовувати їх в якості палива для дизельних двигунів. Використання рослинних олій та їх похідних в якості моторного палива забезпечить зниження викидів в атмосферу вуглекислого газу, що відноситься до групи парникових газів, оскільки вуглекислий газ, що утворюється при згорянні біопалива, поглинається в процесі вирощування культур, що містять олію.

Мета роботи: Проаналізувати результати дослідження фізико-хімічних властивостей рослинних олій і їх сумішей із дизельним паливом та визначення умов застосування їх в дизельних двигунах малої потужності.

Основна частина

Рослинні олії є жирами насіння або плодів різних рослин, отриманих пресуванням або видаленням із застосуванням розчинників. Рослинні олії складаються головним чином (на 95...97 %) із тріацилгліцеринів – органічних з'єднань, складних повних ефірів гліцерину, а також моно- і діацилгліцеринів. Ацилгліцерини, в свою чергу, містять в своєму складі молекули різних жирних кислот, пов'язаних з молекулами гліцерину $C_3H_5(OH)_3$ [1, 2].

Рослинні олії при нормальних умовах частіше вони представляють собою маслянисті рідини з підвищеним в порівнянні з дизельним паливом густиною (звичайно $\rho = 900\text{--}1000 \text{ кг/м}^3$)

та в'язкістю ($\nu = 60\text{--}100 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\nu = 30\text{--}40 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$) та порівняно невисокою температурою самозапалювання [4, 6].

Тому всі рослинні олії є горючими та можуть застосовуватися в якості моторного палива. Низька випаровуваність та висока в'язкість рослинних олій виключають їх використання в бензинових карбюраторних двигунах. Але вони можуть успішно застосовуватися в якості палива в дизельних двигунах. Цьому сприяє порівняно невисока термічна стабільність рослинних олій та прийнятна температура їх самозапалювання, що дорівнює $t_{\text{сз}} = 280\text{--}320 \text{ }^\circ\text{C}$ і лише не набагато перевищує температуру самозапалювання дизельного палива ($t_{\text{сз}} = 230\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$). При цьому метанове число різних рослинних олій змінюється в межах від 33 до 50 одиниць (табл. 1), що близьке до метанового числа дизельних палив (ЦЧ = 40–55) [2].

Особливістю рослинних олій є наявність в їх складі достатньо великої кількості кисню (8–12 %). Це приводить до деякого зниження їх теплоти згоряння. Так, нижча теплота згоряння рослинних олій складає 36–39 МДж/кг проти 42–43 МДж/кг у дизельних палив, які практично не містять кисню [6]. Але присутність в рослинних оліях кисню підвищує температуру їх згоряння в дизельних двигунах і значно покращує екологічні властивості цих палив. В багатьох дослідженнях дизелів, що працюють на рослинних оліях, відмічається зниження димності випускних газів та вмісту в них продуктів неповного згоряння палива при деякому зростанні викидів згоряння NO_x .

Таблиця 1. Фізико-хімічні властивості рослинних олій [6]

Фізико-механічні властивості	Олія							
	рап-сова	ара-хісова	соняшн-икова	соє-ва	паль-мова	олив-кова	бавов-няна	касто-рова
Густина при 20°, кг/м ³	916	917	923	924	918	914	919	1069
В'язкість кінематична, мм ² /с при: 20°С 40 °С 100 °С	75,0 36,0	81,5	65,2	-	-	-	-	-
Цетанове число	36	37	33	50	49	-	-	-
Кількість повітря, необхідного для згоряння 1кг палива, кг	12,6	11,2	11,1	-	-	-	-	-
Теплота згоряння нижча, Qi	37,3	37,0	317,0	36-39	37,1	-	-	-

МДж/кг								
Температура самозапалювання, °С	318	-	320	318	315	285	316	295
Температура застигання, °С	-20	-	-16	-12	+30	-12	-18	-27
Вміст сірки, % (макс.)	0,002	-	-	-	-	-	-	-
Вміст, % по масі								
С	78,0	78,0	-	-	-	-	-	-
Н	10,0	12,3	-	-	-	-	-	-
О	12,0	9,4	-	-	-	-	-	-
Кислотність, мг КОН/100 мл палива	4,66	-	2,14	0,03	0,17	5,90	0,23	0,19
Коксуємість 10 % - го залишку, %, не більше	0,40	-	0,51	0,44	-	0,20	0,23	-

Використання рослинних олій в чистому вигляді в якості палива для дизелів стримується підвищеним творенням нагару – відкладенням коксу на розпилювачах форсунок та інших деталях, що утворюють камеру згоряння. Збільшенню утворення нагару сприяє наявність в рослинних оліях смоли, тобто їх підвищену здатність до коксування. Якщо дизельні палива мають коксуємось 10%-го залишку, що не перевищує 0,3 %, то коксуємось більшості рослинних олій звичайно складає 0,4–0,5%. Для зниження коксування рослинних олій необхідна їх очищення від смоли, а також застосування заходів, що зменшують утворення коксу в умовах камери згоряння дизеля (періодична робота на високофорсованих режимах, періодична подача водопаливних емульсій через отвори для розпилювання і таке інше). Із збільшенням вмісту смол в рослинних оліях, як правило, збільшується і їх кислотність. Підвищена кислотність палива визиває корозію деталей системи паливоподачі і двигуна в цілому. Кислотність більшості рослинних олій не перевищує кислотності дизельних палив, що дорівнює 5 одиниць. Тому корозійна агресивність рослинних олій порівняно невисока і знаходиться на рівні, властивому стандартним дизельним паливам [4].

Недоліком рослинних олій, що використовуються в якості палива для дизельних двигунів, є висока кінематична вязкість при нормальних температурах, обумовлена, головним чином, наявністю в їх складі насичених жирних кислот.

Важною властивістю рослинних олій є здатність змішуватися в любых пропорціях з більшістю органічних розчинників (в тому числі і з нафтопродуктами – бензином та дизельним паливом), що пов'язано з невеликою полярністю олій: їх діелектрична проникність при 20 °С

дорівнює 3,0–3,2 [3]. Ці властивості рослинних олій дозволяють отримувати моторні палива із заданими фізико-хімічними властивостями шляхом змішування різних компонентів в необхідних пропорціях.

В останні роки на кафедрі «Енергетичне машинобудування» проводяться роботи по встановленню можливості і умов застосування «сирих» рослинних олій в якості палива для малопотужних дизелів. В якості дослідного зразка на експериментальному стенді встановлений дизельний двигун Кентавр-300Д потужністю 6 к.с. при частоті обертання колінчастого валу 3000 хв^{-1} . На першому етапі дослідних робіт зняті параметри двигуна при роботі на дизельному паливі. Для подальших дослідних робіт з використанням рослинних олій потрібно знати їх фізико-хімічні властивості і, в першу чергу, кінематичну в'язкість. Саме від кінематичної в'язкості палива із рослинної олії залежить надійна робота паливної апаратури двигуна, а тому вона має незначно відрізнятися від кінематичної в'язкості дизельного палива. Для визначення кінематичної в'язкості соняшникової та соєвої олій були проведені відповідні експериментальні дослідження при різних їх температурах, результати яких приведені на рис.1 та рис.2. Зважаючи на високу кінематичну вязкість вказаних олій порівняно з дизельним паливом навіть при нагріві до температури $75 - 85^\circ\text{C}$, були проведені дослідження залежності в'язкості сумішей цих олій з дизельним паливом. Результати досліджень приведені на рис.1 та рис.2.

Висновки

Аналізуючи результати проведених досліджень в'язкості рослинних олій та їх сумішей з дизельним паливом можна зробити такі висновки:

1. При температурі навколишнього середовища $20...25^\circ\text{C}$ соняшникова та соєва олії мають високу кінематичну вязкість (відповідно 81cSt та 59cSt), а тому їх не можна застосовувати в поршневих ДВЗ без попередньої підготовки – нагріванню до температури $80...90^\circ\text{C}$, або в суміші із дизельним паливом і нагріванням.

2. При нагріванні соняшникової та соєвої олій до температури $70-95^\circ\text{C}$ їх кінематична вязкість суттєво зменшується (див. рис.1, рис.2) і складає для соняшникової олії 14cSt при температурі 72°C , 11cSt при температурі 95°C – для соєвої олії. Але при цьому їх висока вязкість також не уможливорює застосування в якості палива для дизельного двигуна без конструктивної доробки паливної апаратури, особливо розпилювача форсунки.

3. Встановлено також, що при температурі $20-25^\circ\text{C}$ суміші рослинних олій з ДП можуть бути придатними для подачі в циліндри дизельного двигуна лише при вмісту дизельного палива не менше 85 %.

Для зменшення вмісту дизельного палива у суміші з рослинними оліями до 50 % її необхідно підігрівати до температури $75...90^\circ\text{C}$, або ж вносити конструктивні зміни в паливну апаратуру.

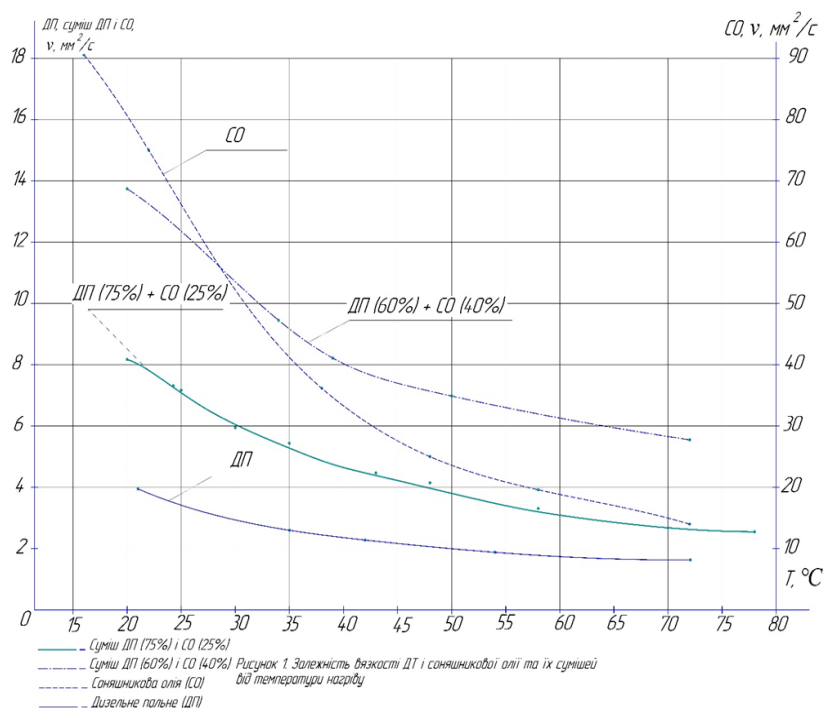


Рисунок 1— Залежність кінематичної в'язкості дизельного палива (ДП), соняшникової олії (СО) та їх сумішей від температури нагріву.

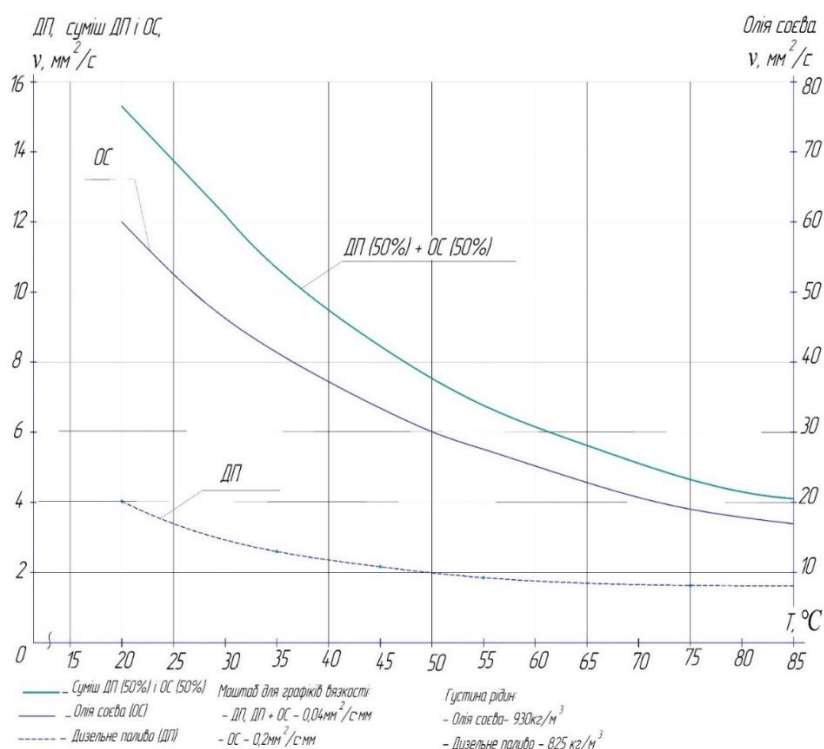


Рисунок 2 — Залежність кінематичної в'язкості соєвої олії, дизельного палива та їх суміші від температури нагріву

Література

[1] I. Shvets, O. Hrabovenko, S. Dotsenko, V. Nesterenko. Results of the Experimental Research of the Medium Speed Diesel Engine Work on Soybean Oil. // Proceedings of 24th International

Scientific Conference Transport Means, 2020: - Kaunas, Lithuania, 2020 – I part, 1038p., ISSN 1822-296 X (print), ISSN 2351-7034 (online) pp. 671-675

[2] S. Dotsenko, V. Nesterenko, A. Lysykh, O. Hrabovenko, I. Shvets., Mathematical Modelling of Emissions of Toxic Components of a Medium Speed Diesel Engine when Operating on Soybean Oil. Proceedings of 27th International Scientific Conference Transport Means, 2023: - Palanqa, Lithuania, 2023 – II part, 985p., pp. 921-927, ISSN 1822-296 X (print) ISSN 2351-7034 (online)

[3]. Іваненко, О. В., Козак, В. М. (2019). Дослідження фізико-хімічних властивостей рослинних олій та їх вплив на роботу дизельних двигунів. Вісник НТУУ «КПІ», №3, с. 45–52.

[4]. Взаємодія рослинних олій з робочими контактними поверхнями деталей паливної апаратури дизельних двигунів / В. Я. Ошовський, О. І. Грабовенко, І. А. Швець // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кропивницький : ЦНТУ, 2019. - Вип. 49. - с. 186-193.

[5]. О.І. Грабовенко, С.М. Доценко, В. В. Нестеренко, І.А. Швець. Використання рослинної олії в якості палив в середньо оборотному дизельному двигуні. Двигуни внутрішнього згорання.–2021.№ 2. ISSN 0419-8719, 79-86 с.

[6]. Горбов В.М. Енергетичні палива: Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2003. - 328 с.

Features of the application of vegetable oils as fuel for low – power diesel engines

Hrabovenko O., Petrenko S.

*Pervomaysk Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov Naval Academy
Pervomaysk, Ukraine*

Abstract. *The physicochemical properties of vegetable oils are considered and the conditions for their use as fuel for low-power diesel engines are determined. The feasibility of preheating vegetable oils and their mixtures with diesel fuel to improve fuel characteristics is substantiated.*

Keywords: *diesel engine, vegetable oils, kinematic viscosity, mixtures of oil and diesel fuel.*

УДК 621.436:662.7

ПОКРАЩЕННЯ ОЧИСТКИ ПАЛИВА ДЛЯ ДВИГУНІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Погорлецький Д. С., к. т. н. доцент¹, Грицук І. В., д. т. н. професор²,

Худяков І. В., к. т. н. доцент³, Олійников С. В., магістр⁴.

Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна

²Національний університет Чернігівська політехніка, м. Чернігів, Україна

¹dimon150582@gmail.com, ²gritsuk_iv@ukr.net, ³Igor.khudiakov563@gmail.com,

⁴stas.npo100@gmail.com.

Анотація. *Розглянуто, та проведено аналіз досліджень щодо застосування різних способів очистки суднових палив, для його спалювання в циліндрах дизельних двигунів. На даний час практично всі сучасні суднові двигуни використовують середньо та високов'язкі палива, а також альтернативні види палив. В зв'язку з цим змінилися і вимоги до якості палив, став більшою мірою виявлятися вплив експлуатаційних властивостей палив на ефективність використання, яка, у свою чергу, перебуває у прямій залежності від якості підготовки (очистки) до спалювання в судовому двигуні. Для забезпечення якісної паливopідготовки та подальшого ефективного паливовикористання, новостворені судна комплектуються спеціальними системами очистки та подачі палива, а паливні системи дизельних двигунів діючих суден переобладнаються з урахуванням можливості застосування середньо та високов'язких палив, різного фракційного складу.*

Ключові слова: *очистка палива, каталітичні домішки, судові двигуни, паливopідготовка, фракційний склад палива.*

Вступна частина. Природоохоронне законодавство спонукає до збільшення попиту на низькосірчисті види палива. Це своє чергу, спонукало нафтопереробні заводи збільшувати виробництво сумішей важкого дизельного палива, змішування палива є основним джерелом каталітичних частинок. Перші Зони емісійного контролю були впроваджені у Північній Європі, в період з 2006 по 2007 рік. Аналогічні тенденції спостерігаються при зміні правил та появі нових Зон емісійного контролю. Нова Північноатлантична зона контролю буде встановлена до кінця 2027 року. Вона простягається вздовж берегової лінії від Португалії до Гренландії, прилягаючи до вже встановлених зон у Північному морі, на Балтиці та Середземномор'ї. Види палива з високим вмістом каталітичних часток можливо знайти у складі практично усіх марок залишкового палива. Однак легші марки характеризуються меншою концентрацією каталітичних часток проти марок з більшою в'язкістю. 13 грудня 2023 року була проведена 28-ма конференція ООН зі зміни клімату (COP28) фінальне рішення, якої містить формулювання про можливість «переходу від викопного палива в судових енергетичних установках (CEU), це є справедливим рішенням, в критичне десятиліття, для досягнення чистого нуля до 2050 року відповідно наукових досягнень». Сучасна лінія паливopідготовки є комплексним рішенням для очистки палива та мінімізації енергоспоживання і максимального захисту від впливу каталітичних часток, це комплексний та систематичний підхід, який засновано на ключових знаннях виробників очисного обладнання.

Ціль роботи – *аналіз можливості використання та покращення різних способів очистки палив для судових енергетичних установках.*

Основна частина. Аналіз досліджень щодо підготовки судового палива до його спалювання в циліндрах дизельного двигуна демонструє, що традиційними методами очищення палива є відстоювання, сепарація, фільтрація, завданням яких є видалення води, механічних домішок, золи. Це завдання сформулювалося в результаті аналізу впливу домішок, що знаходяться в паливі, на показники роботи дизельного двигуна та тих методів і засобів паливopідготовки, які мають більшість CEU [1–6]. Відстоювання палива як метод очищення від механічних домішок і води здійснюється під дією сили тяжіння за рахунок більшої щільності забруднюючих часток. Відстоювання є найпростішим методом очищення палива, у даний час втрачає своє значення і застосовується як самостійний метод – для палив з в'язкістю до 20 сСт. Одним з основних методів очищення палива на судах є сепарація, в процесі якої зменшується вміст механічних домішок, води та солей. Ефективність очищення методом сепарації різна для різних видів палива. Відрізняється вона і для різних партій палива. Вагомий вплив на ефективність очищення палива методом сепарації має груповий склад, співвідношення дистильованих і залишкових компонентів, прийняте при його компаундуванні та обраний режим сепарації. При сепарації відділення домішок здійснюється за рахунок відцентрової сили.

Результати досліджень [1–5] демонструють, що малов'язке паливо очищається з більшою ефективністю ніж високов'язке. Вміст механічних домішок під час сепарації палива з в'язкістю 50...100 сСт зменшується на 70...80 %, а з в'язкістю 180...380 сСт – на 50...60 %, в'язкістю більше 380 сСт – на 20...40 %. Вміст води після процесу сепарації в малов'язких паливах зменшується на 100 %, у середньов'язких – на 95...100 %, у високов'язких – на 75...85 %. Зазначені рівні зниження механічних домішок та води супроводжуються втратами паливної частини палива, переважно важких її компонентів (асфальтенів і смол). Ці втрати можуть досягати 2...3 %, знижуючи пропорційно теплотворну здатність палива, що є недоліком сепарації [5, 6]. Сепарація середньо і високов'язких палив проводиться при підігріві палива до 80...90 °С, цей метод підготовки супроводжується посиленням окисних процесів, що підвищують вміст смолистих речовин. У системах паливопідготовки на суднах також використовувалися альтернативні способи, які забезпечують покращення якості високосірчистих палив. До таких способів належить використання гомогенізації, застосування водопаливних емульсій, а також використання присадок до палива. Великий внесок у розвиток теоретичних питань гомогенізації палива, можливості її застосування у судових умовах внесла школа українських вчених, очолювана д. т. н., професором Ю. Я. Фоміним [1–6]. Основним завданням, рішення якої забезпечувалося при гомогенізації палива, було збереження теплотворної здатності палива за рахунок зменшення шламоутворення та видалення з ним горючих складових палива.

Використання присадок до судових палив також не набуло широкого поширення в судовій практиці і використовується в поодиноких випадках фірмами, які самостійно виробляють присадки та мають у своєму підпорядкуванні судна [1–6]. При цьому слід визнати, паливні присадки сприяють покращенню процесу згоряння палива, але їх вплив на корозійне зношування циліндропоршневої групи та екологічні показники роботи дизельного двигуна неоднозначні. Ультразвукова обробка палива також розглядається під час проєктування і модернізації систем паливопідготовки [1–6]. Цей вид паливопідготовки вивчався з точки зору створення стійких сумішей палива різної щільності та структурного складу, а його використання з метою зниження концентрації сірковмісних компонентів з паралельним впливом на корозійне зношування і екологічні параметри роботи дизельного двигуна не вивчалися. Таким чином, незважаючи на велику кількість досліджень, виконаних як окремими вченими, і науковими організаціями, більшість з них стосується оптимізації стандартних способів паливопідготовки, не виконуючи глибокого аналізу альтернативних способів удосконалення систем паливопідготовки судових двигунів. Різні джерела вказують на тенденцію збільшення концентрації каталітичних часток у важкому паливі для судових двигунів. Дані, отримані DNV Petroleum Services (DNVPS), підтверджують це твердження. На рис. 1 показані концентрації каталітичних часток у різних марках палива.

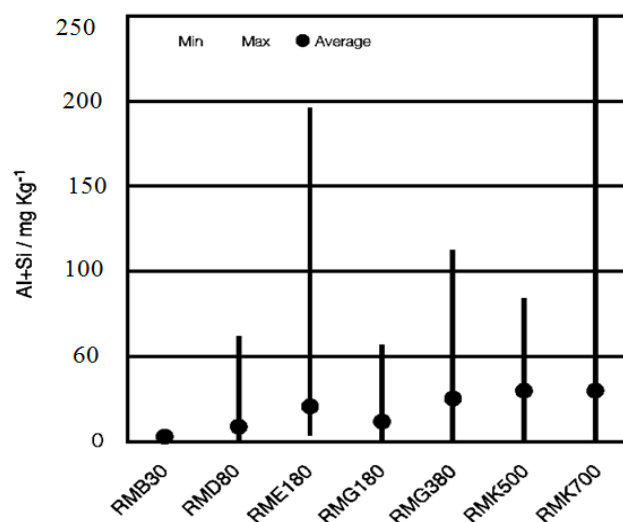


Рисунок 1 – Середній показник концентрації каталітичних часток різних марок палива

Концентрація Al+Si у різних марках палива вимірюється в мг/кг (що еквівалентно ppm по відношенню до ваги), на цій підставі виділяються сім залишкових видів палива. Висота стовпців є те, як концентрація каталітичних часток змінюється відповідно до в'язкості палива. Зверніть увагу, що найпоширеніша марка палива RMG 380 cСт містить каталітичні частки в діапазоні від 1 до 110 ppm Al+Si, а RMG 700 – до 400 ppm Al+Si. У середньому концентрація каталітичних часток вища у марках палив з більш високою в'язкістю (VeriFuel, Alfa Laval). Каталітичні частки є дуже твердими, зазвичай складаються з сполук кремнію та алюмінію. Їхня присутність у судновому залишковому паливі є наслідком каталітичного крекінгу. Присутність каталітичних часток небажана, оскільки вони можуть спричинити важке абразивне зношування двигуна, якщо їх не видалити за допомогою системи підготовки палива (Alfa Laval AB, BP Marine Ltd & MAN B&W Diesel A/S). Склад каталітичних частинок варіюється в залежності від типу вихідної сировини. Склад каталізаторів не розкривається нафтопереробниками, але всі каталізатори містять різні форми синтетичного кристалічного цеоліту. Цеоліти є алюмосилікатні мінерали, які є хорошими каталізаторами завдяки своїй мікропористій структурі і можливості утримувати велику кількість катіонів. Цеоліт, використовується в каталітичному крекінгу, складається з тетраедричних молекул оксиду алюмінію та кварцу з одним атомом алюмінію або кремнію в центрі та одним атомом кисню на кожній вершині (рис. 2, а). Близько 10...60 % обсягу часток складаються з пор (рис. 2, б), посилення їх каталітичних властивостей додають рідкісні метали [1–6].

Перед тим, як паливо надійде в двигун, необхідно провести процедури підготовки палива, включаючи сепарацію і фільтрацію, це дозволить знизити рівень вмісту каталітичних часток бункерного палива. ISO 10478 є стандартизованим методом визначення вмісту алюмінію і кремнію в паливі. Згідно цього методу, використовується атомно-емісійна спектроскопія з

індуктивно зв'язаною плазмою та атомно-абсорбційна спектроскопія. Цей метод дозволяє виміряти концентрацію каталітичних часток у нафтовому паливі, але не показує розподіл розмірів каталітичних часток, що дуже важливо в контексті підготовки палива на борту судна.

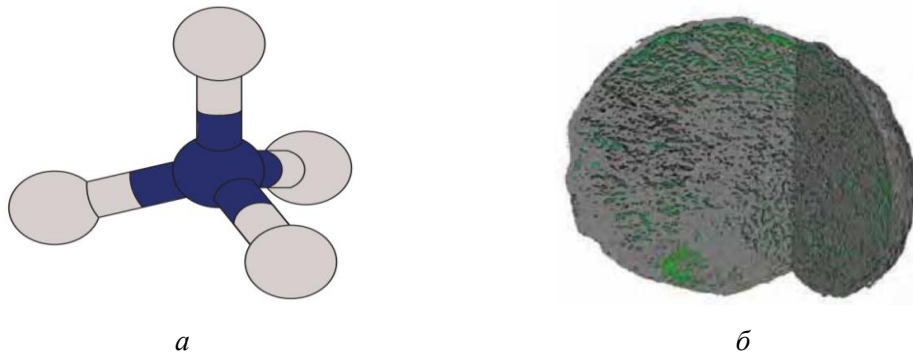


Рисунок 2 – Каталітична частка: *а* – тетраедричні молекулярна структура цеоліту; *б* – поперечний переріз типової каталітичної частки

Ефективне очищення досягається шляхом застосування сепараторів. Можливість сепарації води залежить переважно від питомої ваги палива – за нормальної температури сепарації. В'язкість палива (при температурі сепарації) і швидкість потоку є також визначальними факторами. Здатність сепарації абразивних частинок залежить від розміру та вагових особливостей найменших забруднювачів, які мають бути видалені; зокрема, від в'язкості палива (при температурі сепарації) і швидкості потоку через сепаратор [1–6].

На ефективність сепарації впливають різноманітні параметри, до яких відносяться витрата палива і температура, які контролюють в'язкість і щільність палива. Безперервне керування витратою є простим і ефективним способом забезпечення оптимальної продуктивності сепарації. Судна не завжди працюють з максимальним допустимим безперервним навантаженням та розвивають розрахункову швидкість ходу, за рахунок цього, є можливість зменшити витрату і підвищити ефективність сепарації. Судноплавним компаніям згідно експлуатаційних вимог рекомендується повністю використовувати встановлену пропускну здатність сепаратора та паралельно використовувати резервні сепаратори. Рух «на малих ходах» сприяє більш ефективній сепарації та відноситься до практики експлуатації трансокеанських вантажних суден, контейнерних суден, на швидкості, яка значно нижча за їх максимальну швидкість. Як правило, сепаратор для нафтового палива має конфігурацію, що забезпечує 100 % витрату палива плюс постійні значення для різних діапазонів. Однак двигуни суден сьогодні дуже рідко працюють з 100 % навантаженням. Зменшення витрати пального до сепаратора по відношенню до витрати палива двигуна призведе до підвищення ефективності роботи сепаратора, оскільки паливо залишатиметься у сепараторі довше. За допомогою автоматичного управління витратою з урахуванням фактичного споживання палива двигуном з'являється значний потенціал підвищення ефективності сепарації [1–6].

Для підвищення якості процесу сепарації палива є можливість модернізувати (покращити) режим подачі палива до сепаратора. Найменша подача палива до сепаратора це гарне рішення для підтримки ефективного режиму сепарації важких високов'язких палив. Це досягається за рахунок встановлення окремого об'ємного насосу, біля відстійної цистерни з регулювальним клапаном. З огляду на економічні міркування ця система не є доцільною, тому що насос працює з повною продуктивністю, як наслідок з повною потужністю. Одним зі способів регулювання подачі палива до сепаратора є зменшення продуктивності насоса, але це у свою чергу зменшує його потужність. Максимальний інтервал часу між автоматичним розвантаженням шламу має бути у межах від 1...2 годин. Було вказано, що звичайні сепаратори не можуть забезпечити сепарування палива з густиною понад 990 кг/м^3 при 15°C , це не надає можливості судновласнику скористатися перевагою дешевих палив з високою в'язкістю і високою густиною. Для рішення даної проблеми можливе встановлення частотно-регульованого приводу електродвигуна насоса EI-P7012, це частотний перетворювач скалярного типу, спроектований для технічних систем, які функціонують з надлишковим тиском або змінною витратою рідини. Результати розрахунків потужності електродвигуна насоса в залежності від необхідної продуктивності сепаратору продемонстровано на графічному зображенні (рис. 3).

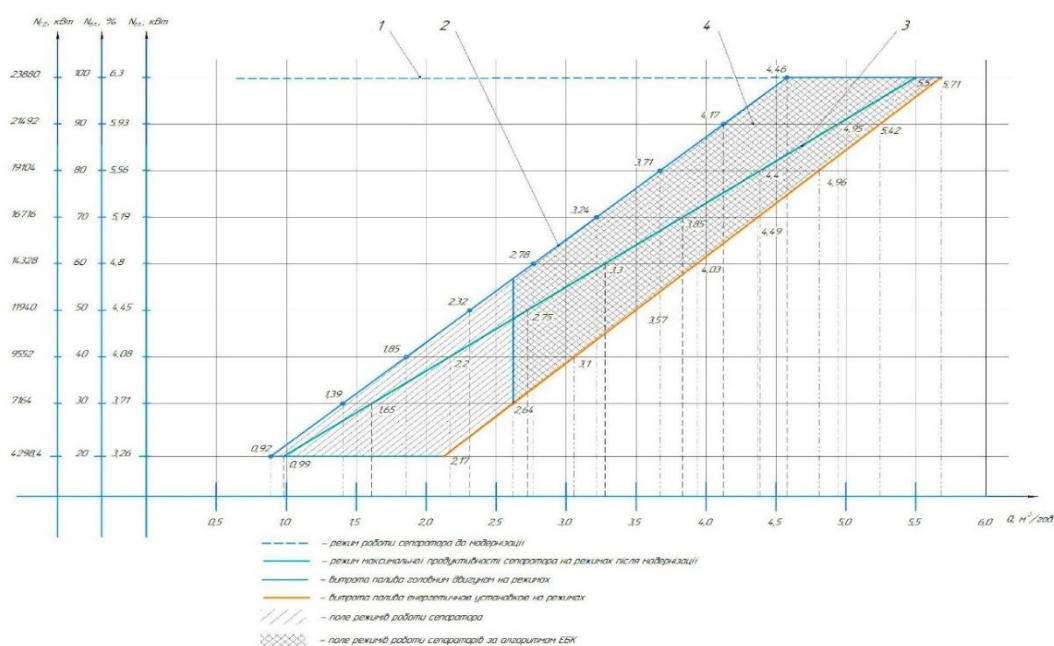


Рисунок 3 – Результати розрахунків потужності електродвигуна в залежності від необхідної продуктивності сепаратору : 1 – режим роботи сепаратора до модернізації; 2 – режим максимальної продуктивності сепаратора на режимах після модернізації; 3 – поле режимів роботи сепаратора; 4 – витрата палива головним судновим двигуном на режимах

Висновки. Було розглянуто способи очистки суднового палива, які використовуються на даний час на судах, а також декілька способів покращення сепарації важкого палива, та запропоновано можливість модернізації сепаратора важкого палива, а саме встановлення частотно-регульованого приводу, продемонстровано оптимальний режим роботи сепаратору, який дозволяє: покращити якість сепарації палива; зменшити витрату електроенергії, витрату палива, утворення відстою у витратних цистернах. Підвищення гнучкості роботи сепараторів на різних сортах палива, а також частотно-регульований привід надасть можливість керувати кількістю обертів насоса, це дозволить регулювати швидкість подачі відповідно до фактичного навантаження суднового двигуна; зміна витрати у випадку використання судновим двигуном, який працює на 75 % від свого навантаження, збільшить ефективність сепарації.

Список літератури

[1] Dzygar A.K., Pogorletskyi D.S., Gritsuk I.V., Khudiakov I.V., Chernenko V.V. Marine fuel management aspects and operational issues. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 11-а Міжнародна науковопрактична конференція, 08–10 вересня 2020 р. – Херсон.

[2] Майбутні види палива та технології. URL:<https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-uptake/> (дата звернення: 01.09.2025).

[3] Білоусов Є. В. Комплексна утилізація відходів сепарації палива в суднових енергетичних установках / Є.В. Білоусов, М.С. Агєєв, Н.Н. Кобяков // Вісник двигунобудування. – 2011. – № 2. – С. 111–114.

[4] Погорлецький Д.С., Манжелей В.С., Лисенко В.М., Матко Д.В. Вимоги та правила Міжнародної морської організації (ІМО), що до застосування низькосірчаних палив. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 3–4 грудня 2020 р.

[5] 6. Солодовніков В.Г. Використання в суднових дизелях палив різного фракційного та структурного складу / В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. - 2014. - № 33. - Одеса: ОНМА. - С. 110-117.

[6] 4. Застосування двоступінчастої обробки палива для покращення робочих параметрів та експлуатаційних характеристик суднового дизеля/ В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки. – 2014. – Вип. 34. – С. 130.

Pohorletskyi Dmytro., Gritsuk Ihor., Khudyakov Ihor., Oleinikov Stanislav.

Improving fuel cleaning for marine power engines

The article considers and analyzes research on the use of various methods of cleaning marine fuels for its combustion in the cylinders of diesel engines. Currently, almost all modern marine engines use medium and high-viscosity fuels, as well as alternative types of fuels. In this regard, the requirements for fuel quality have changed, and the influence of the operational properties of fuels on the efficiency of use, which, in turn, is directly dependent on the quality of preparation (cleaning) for combustion in a marine engine, has become more apparent. To ensure high-quality fuel preparation and further effective fuel use, newly built vessels are equipped with special fuel cleaning and supply systems, and the fuel systems of diesel engines of operating vessels are re-equipped taking into account the possibility of using medium and high-viscosity fuels of different fractional composition.

Keywords: fuel purification, catalytic additives, marine engines, fuel preparation, fuel fractional composition.

УДК 665.347.8:621.436

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ШЛЯХИ ПЕРЕРОБКИ СОЄВОЇ ОЛІЇ У ПАЛИВО ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Швець І. А.,

старший викладач

кафедри енергетичного машинобудування

Первомайського навчально-наукового інституту

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Первомайськ, Україна

e-mail: ihor.shvets@nuos.edu.ua

Анотація. Розглянуто основні технологічні напрями переробки соєвої олії як сировини для виробництва палива дизельного типу. Проаналізовано фізико-хімічні властивості та проблеми її використання у двигунах внутрішнього згорання, зокрема схильність до утворення лаків і осадів. Наведено можливі шляхи очищення і трансформації компонентів олії з метою отримання стабільного, екологічно безпечного та енергетично ефективного палива. Описано основні технології - трансестерифікацію, гідропіроліз та каталітичне крекінгування, а також їх вплив на якість палива й екологічні показники.

Ключові слова: *соєва олія, біодизель, трансестерифікація, гідропіроліз, каталітичне крекінгування, альтернативне паливо, дизельний двигун.*

Вступ

Сучасні енергетичні тенденції спрямовані на пошук відновлюваних і екологічно безпечних джерел енергії, здатних частково або повністю замінити викопні палива. Серед можливих альтернатив значну увагу привертають рослинні олії, зокрема соєва, яка вирізняється високою теплотворною здатністю, стабільністю постачання сировини та відносно невисокою в'язкістю порівняно з іншими оліями [2, 3].

Разом з тим, використання сирової соєвої олії у дизельних двигунах без попередньої підготовки спричиняє низку експлуатаційних ускладнень: підвищення в'язкості, неповне згорання, утворення лакових, смолистих і коксових відкладень на деталях паливної апаратури, а також зростання викидів СО та СН [5]. Такі процеси зумовлені складною хімічною природою олії, що містить тригліцериди, фосфоліпіди, гліцерин, вільні жирні кислоти та продукти омилення, які під дією температури полімеризуються та окиснюються [4].

Тому ключовим завданням сучасних досліджень є розроблення ефективних технологічних процесів переробки соєвої олії, спрямованих на видалення небажаних компонентів і перетворення тригліцеридів у стабільні вуглеводневі сполуки, придатні для спалювання в дизельних двигунах. Метою є отримання палива, максимально наближеного за характеристиками до нафтового дизеля, при цьому без істотного зростання його собівартості - не більш ніж удвічі від вартості вихідної сировини.

Основна частина

Хімічна основа соєвої олії переважно складається з тригліцеридів ненасичених жирних кислот: лінолевої, олеїнової, ліноленової, пальмітинової, стеаринової та інших. Такий склад зумовлює високий вміст кисню і підвищену в'язкість в декілька разів більшу, ніж у дизпалива при 20 °С. Високий вміст ненасичених кислот визначає добрі властивості щодо горіння та виділення тепла, проте наявність фосфоліпідів, продуктів омилення та гліцерину спричиняє схильність до полімеризації і утворення лакових відкладень.

Тому для покращення властивостей сировини необхідна переробка, спрямована на: видалення полярних домішок, розщеплення тригліцеридів на легші компоненти а також часткове або повне насичення молекул воднем. Для реалізації цього необхідна хімічна модифікація молекул через реакції трансестерифікації, гідрогенізації або термokatалітичного крекінгу [1].

Найпоширеніший спосіб переробки соєвої олії – метанольна або етанольна трансестерифікація тригліцеридів у присутності лужного каталізатора (NaOH, KOH). У результаті реакції утворюються метилові ефіри жирних кислот та гліцерин як побічний продукт за формулою:



Недоліком цього методу є утворення гліцерину, який необхідно відокремлювати та утилізувати, а також чутливість реакції до вмісту води і вільних жирних кислот. Попереднє очищення сировини (дегумінізація, осадження фосфоліпідів) є обов'язковим етапом. Видалення гліцерину, метанолу, каталізаторів та мила потребує багатостадійного очищення, що збільшує собівартість продукту майже вдвічі.

Альтернативні методи переробки соєвої олії передбачають глибше хімічне перетворення тригліцеридів із повним видаленням кисневмісних груп та утворенням вуглеводнів, сумісних з нафтовими паливами.

Гідропіроліз (гідродексигенація) – це процес термічного розкладання соєвої олії в присутності водню та каталізаторів при температурах 350–450 °С і тиску до 20–30 МПа. У результаті відбувається дексигенація, гідрогенізація та декарбонізація, що приводить до утворення насичених вуглеводнів, повністю сумісних з дизельними фракціями нафти. Отримане паливо, відоме як гідрооброблений рослинний дизель або *green diesel*, характеризується високою термічною стабільністю, низькою температурою застигання (до –20 °С) та мінімальною схильністю до відкладень [6].

Іншим перспективним напрямом є каталітичне або термокatalітичне крекінгування, що здійснюється при 400–500 °С у присутності цеолітових або алюмосилікатних каталізаторів. Процес відбувається за участю інертного газу чи перегрітої пари й приводить до утворення дизельної, бензинової та газової фракцій, які можуть бути інтегровані у стандартні паливні потоки нафтопереробних підприємств [6, 7]. Перевагами цього методу є можливість використання відпрацьованих олій, простота очищення продукту та пристосованість до існуючої

інфраструктури. Недоліком залишається коксування поверхні каталізатора і підвищені енергетичні витрати, що потребує подальшої оптимізації процесу.

Обидві технології дозволяють отримати високоякісне паливо з покращеними експлуатаційними й екологічними показниками, проте вимагають значних енерговитрат та високотемпературного обладнання, що наразі обмежує їх широке промислове застосування.

Вплив технологічної переробки на експлуатаційні та екологічні показники

Результати досліджень свідчать, що після трансестерифікації або гідропіролізу: знижується в'язкість та покращується розпилювання у форсунках, зменшується схильність до утворення лакових і коксувальних відкладень, спостерігається зменшення викидів CO₂, CH₄, CO та диму порівняно з традиційним дизельним паливом [5, 7] а також зниження схильності до полімеризації під час тривалого зберігання. Ці фактори свідчать, що технологічна переробка не лише покращує хімічні параметри палива, але й опосередковано підвищує його екологічну якість.

Енергетична та економічна доцільність

Ключовою умовою широкого впровадження палива на основі соєвої олії є збереження економічного балансу між витратами на переробку та якістю кінцевого продукту. Процес технологічного синтезу має забезпечувати прийнятну собівартість - не більше ніж у два рази вищу за вартість вихідної сировини, що є критичним показником для комерційної реалізації.

За розрахунками [7], собівартість біодизеля після стандартної трансестерифікації становить 1,5–1,8 від вартості сирової олії, що відповідає вимогам економічної ефективності для малих і середніх виробництв. Для гідропіролізу цей показник може сягати 2,5–3,0, однак отримане паливо має вищу термічну стабільність, меншу схильність до відкладень і може змішуватися з нафтовими дистилятами без втрати експлуатаційних властивостей.

За сучасними оцінками [1, 3, 7], використання комбінованих технологій очищення та переробки дозволяє знизити енерговитрати на 15–20 % і забезпечити економічну доцільність процесу. Крім того, екологічні переваги - зменшення викидів CO₂, CH₄ та димності – підсилюють привабливість соєвого біопалива як альтернативного джерела енергії для дизельних систем.

Висновки

Найбільш технологічно доцільним напрямом переробки є трансестерифікація, яка забезпечує одержання метилових ефірів жирних кислот (біодизеля) з оптимальними фізико-хімічними властивостями.

Гідропіроліз та каталітичне крекінгування також є перспективними альтернативами, оскільки дозволяють отримати вуглеводневі палива, сумісні з нафтовими дистилятами та придатні для змішування без значних модифікацій двигуна. Вилучення фосфоліпідів, гліцерину та продуктів омилення є обов'язковим етапом для підвищення стабільності, термічної стійкості та зниження схильності до окиснення палива. Хімічна переробка сприяє зменшенню викидів CO, CH₄ і димності, а також підвищує повноту згоряння й енергоефективність двигуна.

Література:

1. Atabani A.E. et al. "Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, characterization, and biodiesel production." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022.
2. Knothe G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 2014.
3. Hoekman S. K. et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
4. V. Nesterenko, V. Oshovskyi, I. Shvets, O. Hrabovenko, I. Ursulenko, Problems of using plant oils as fuel in diesel engines. *Proceedings of 29th International Scientific Conference Transport Means*, 2025: - Palanqa, Lithuania, 2025.
5. S. Dotsenko, V. Nesterenko, A. Lysykh, O. Hrabovenko, I. Shvets. Mathematical Modelling of Emissions of Toxic Components of a Medium Speed Diesel Engine when Operating on Soybean Oil. *Proceedings of 27th International Scientific Conference Transport Means*, 2023: - Palanqa, Lithuania, 2023.
6. Leung D.Y.C., Luo Y., Guo Y. "Biodiesel production from waste cooking oil using mixed alkali–earth oxide catalysts." *Applied Energy*, 2020.
7. Demirbas A. "Biofuels securing the planet's future energy needs." *Energy Conversion and Management*, 2019.

PROMISING TECHNOLOGICAL PATHWAYS FOR SOYBEAN OIL CONVERSION INTO DIESEL ENGINE FUEL

Ihor Shvets

Senior Lecturer,

Department of Power Engineering Machinery,

Pervomaisk Educational and Research Institute,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Pervomaisk, Ukraine

e-mail: ihor.shvets@nuos.edu.ua

Abstract

The paper presents an overview of the main technological pathways for converting soybean oil into diesel-type fuel. The physicochemical properties and specific challenges of using raw soybean oil in internal combustion engines-such as the tendency to form deposits and varnishes-are analyzed. Possible purification and transformation routes are described to obtain a stable, environmentally friendly, and energy-efficient fuel. Particular attention is given to transesterification, hydrolysis, and catalytic cracking technologies, as well as their impact on fuel quality and emission characteristics.

Keywords: *soybean oil, biodiesel, transesterification, hydrolysis, catalytic cracking, alternative fuel, diesel engine.*

УДК 621.431

**МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ОЦІНКИ СТАНУ ДВИГУНІВ
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ У СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ****Познанський А. С., к. т. н., доцент¹***Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,**Україна, м. Миколаїв***Цимбал А. А.², Чібісов В. С.³, Шевчук Д. В.⁴, Яковенко О. П.⁵, магістри,***Первомайський навчально-науковий інститут Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова*¹ andrii.poznanskyi@nuos.edu.ua, ² andrii.tsymbal@gmail.com, _³ viktor.chibisov@gmail.com, ⁴ danilo.shevchuk@gmail.com, _⁵ oleksandr.yakovenko@gmail.com

Анотація. Технічна діагностика суднових дизелів підвищує ефективність обслуговування, надійність і тривалість служби через оцінку їхнього стану. Сучасні датчики та алгоритм «безфазової синхронізації» дозволяють точно визначати параметри подачі палива, згоряння та газорозподілу. Це забезпечує своєчасне виявлення несправностей, планування ремонту та контроль технічного стану паливної апаратури і циліндро-поршневої групи.

Ключові слова: технічна діагностика, суднові дизелі, робочий процес, алгоритм безфазової синхронізації, система контролю та вимірювань.

Одним із способів підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту, а також забезпечення експлуатаційної надійності та тривалості служби суднових дизелів є широке застосування засобів технічної діагностики під час роботи суднових екіпажів, берегових підприємств і судноремонтних заводів [1].

Процес діагностування включає визначення поточного технічного стану дизеля (діагностика), прогнозування його стану у майбутньому та оцінку технічного стану, який він мав у минулому.

Головну роль відіграє перша операція – визначення технічного стану та справності дизеля. Це дає змогу виконувати технічне обслуговування та ремонт відповідно до фактичного стану дизеля, підвищуючи надійність його роботи. Під час другої операції оцінюють залишковий ресурс справного дизеля. Третю операцію застосовують, зокрема, для встановлення наслідків аварійних відмов дизелів. Експлуатація дизелів дедалі більше спирається на засоби контролю та діагностики їхнього технічного стану з використанням вимірювальної апаратури та обчислювальних систем. Розпочато розробку нових засобів діагностування другого покоління, а також створено промислові зразки автоматизованих діагностичних станцій двигунів, що базуються на комплексі комбінованих інерційних стендів та системі вимірювальних перетворювачів для збору інформації за великою кількістю параметрів [2].

Сучасні системи діагностування дизелів переважно базуються на електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ). Використовуються як судові ЕОМ, так і децентралізовані системи діагностики, що обробляють обмежену інформацію та оцінюють технічний стан окремих вузлів і агрегатів дизеля. За структурою такі системи зазвичай інтегрують із централізованими системами контролю або працюють автономно. ЕОМ у системах діагностування можуть бути спеціалізованими або універсальними – міні- та макро-ЕОМ.

Система діагностування є специфічною системою управління або контролю, специфіка якої полягає у цілі визначення технічного стану об'єкта дослідження. Відповідно, при розробці системи технічного діагностування вирішуються ті ж завдання, що й при створенні інших систем управління або контролю: вивчається об'єкт та можливі дефекти з ознаками їх прояву, обирається або створюється математичне описання (модель) поведінки справного об'єкта та його несправних модифікацій, за потреби вносяться зміни у структуру й конструкцію об'єкта для забезпечення необхідних умов діагностування, підбираються або розробляються засоби діагностування, а також проводиться розгляд і розрахунок характеристик системи технічного діагностування.

Суть технічного діагностування полягає у розробці та практичній реалізації алгоритмів оцінки технічного стану об'єктів без проведення їх розбирання в робочих умовах. Найважливішу роль відіграють структурні властивості об'єкта діагностування, які визначаються сукупністю його елементів і взаємозв'язків між ними, формуються при створенні системи та проявляються в процесі її експлуатації.

Енергетичну установку (ЕУ) можна розглядати як складну систему, що виступає об'єктом діагностування. ЕУ поділяється на три рівні взаємопов'язаних систем, які відрізняються елементними властивостями та міжелементними зв'язками. Перший рівень – сама ЕУ, що складається з агрегатів, пристроїв і механізмів, у яких послідовно відбувається повний цикл перетворень або передачі енергії; ці елементи є функціонально самостійними елементами (ФСЕ). На другому рівні об'єктами діагностування виступають ФСЕ, що складають ЕУ, а їхніми елементами підсистеми є деталі або вузли. Третій рівень описує структуру ФСЕ на рівні молекулярних зв'язків; порушення цих зв'язків призводить до утворення тріщин, ерозійних і корозійних ушкоджень у конструкційному матеріалі деталей, розміри яких також можуть враховуватися як структурні параметри [4].

Переносні системи діагностування використовуються на судових і стаціонарних дизельних установках з 1996 року. Накопичений великий досвід експлуатації, який дозволив створити вискоєфективний алгоритм «безфазової синхронізації» (БФС) – визначення ВМТ, НМТ і подальшої синхронізації даних, без використання датчиків на маховику. Алгоритм був розроблений і вперше застосований в переносних системах *DEPAS*. Параметри робочого процесу визначаються по трьох інформаційних каналах: процес згоряння, процес впрыскування палива, фази газорозподілу.

Основним вимірювальним елементом системи є датчик тиску газів у циліндрі дизеля PS-16. Він здійснює вимірювання тиску під час робочого процесу двигуна. Отримані дані використовуються для розрахунку індикаторної потужності циліндра та визначення основних параметрів робочого процесу.

Аналіз віброімпульсів різних вузлів паливної апаратури та циліндропоршневої групи дизеля дозволяє визначати параметри подачі палива та газорозподілу. Вібродатчик VS-20 призначений для визначення фазових характеристик цих процесів. Для остаточної обробки сигналів застосовується метод двохнапівперіодичного детектування.

Алгоритм БФС забезпечує автоматичний облік впливу скручування колінчастого валу, невідповідності між істинним положенням ВМТ і маркуванням на маховику, що виникає через можливу неточність маркування, зазори в деталях КШМ та інші експлуатаційні фактори, а також вплив кінцевої швидкості проходження хвилі тиску в каналі індикаторного крана. Крім того, алгоритм дозволяє контролювати технічний стан паливної апаратури та циліндро-поршневої групи дизелів.

Висновки. 1. Діагностування дає змогу виявляти приховані несправності, запобігати відмовам, визначати обсяг необхідних планових ремонтних робіт та прогнозувати ресурс справної роботи дизелів. 2. Це сприяє значній економії витрат на змінні та запасні частини, матеріали для планово-попереджувальних робіт, а також підвищує термін служби та надійність дизелів. 3. На основі діагностованих параметрів можна оцінити працездатність і технічний стан об'єктів діагностування.

Список літератури

- [1] Гутаревич Ю.Ф. Випробування двигунів внутрішнього згорання: навчальний посібник / Ю.Ф. Гутаревич, А.О. Корпач, А.Г. Говорун. – К.: НТУ, 2013. – 249 с.
- [2] Neumann S. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data / S. Neumann, R. Varbanets, O. Kyrylash та ін. // Diagnostyka. – 2019. – № 20(2). – Р. 19–26.
- [3] Варбанець Р.А. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Варбанець Р.А., Залож В.І., Тарасенко Т.В., Кучеренко Ю.М., Клименко В.Г. // Двигуни внутрішнього згорання. – 2020. – № 1. – С 14–21.
- [4] Chirica I. Retrofit Solutions for Green and Efficient Inland Ships / Chirica I., Presura A., Anghelută C.M. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019 – Volume 1297, 5th International Scientific Conference SEA-CONF. p.p. 17–18.

Poznanskyi A., Tsymbal A., Chibisov V., Shevchuk D., Yakovenko O.

Methods for monitoring and assessing the condition of internal combustion engines in marine power plants

Technical diagnostics of marine diesel engines improve maintenance efficiency, reliability, and service life by assessing their condition. Modern sensors and the "phase-free synchronization" algorithm enable precise determination of fuel injection, combustion, and gas distribution parameters.

This ensures timely detection of faults, maintenance planning, and control of the technical condition of the fuel system and the cylinder-piston group.

Keywords: technical diagnostics, marine diesel engines, working process, phase-free synchronization algorithm, monitoring and measurement system.

УДК 621.43

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАПАЛЮВАННЯ СУДНОВОГО ГАЗОВОГО ДВИГУНА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ФОРКАМЕРНО- ФАКЕЛЬНОГО ПРИНЦИПУ

Познанський А. С., к. т. н., доцент ¹

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,

Україна, м. Миколаїв

Бондар М. Д. ², Капура І. А. ³, Кириченко О. С. ⁴, Медведєв О. М. ⁵, магістри,

Первомайський навчально-науковий інститут Національного університету

*кораблебудування імені адмірала Макарова_*

¹ andrii.poznanskyi@nuos.edu.ua, ² mykhailo.bondar@gmail.com,

³ ihor.kapura@gmail.com, ⁴ oleksandr.kyrychenko@gmail.com, _

⁵ oleksii.medvediev@gmail.com

Анотація. Розглянуто удосконалення системи запалювання головного суднового газового двигуна за форкамерно-факельним принципом. Конструкція форкамери забезпечує надійне займання сумішей, підвищує стабільність згоряння та знижує шкідливі викиди. Це сприяє підвищенню ефективності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок.

Ключові слова: форкамера, газоподібне паливо, ефективність, система запалювання, судновий газовий двигун.

Дефіцит рідкого нафтового моторного палива, а також високе забруднення повітря його продуктами викликали необхідність пошуку альтернативних палив. Єдиним економічно виправданим альтернативним паливом наразі визнано газове паливо, яке можна застосовувати в якості моторного палива без будь-якої переробки, крім обов'язкової технологічної стадії видобутку і транспорту газу - промислової підготовки. Ресурси газового моторного палива набагато переважають ресурси рідкого палива. За своїми властивостями газове моторне паливо перевершує нафтові палива. При застосуванні його в двигунах забезпечуються високі техніко-економічні показники таких машин, так як газ має хороші антидетонаційні якості, сприятливі умови сумішоутворення і широкі межі займання в суміші з повітрям [1, 2].

Перехід суднових енергетичних установок на газоподібне паливо є одним із ключових напрямів зменшення шкідливих викидів та підвищення енергоефективності морського

транспорту. Проте газові двигуни мають схильність до нестабільного займання бідних сумішей, що ускладнює їхню експлуатацію в суднових умовах. Тому актуальним є вдосконалення системи запалювання, здатної забезпечити надійне займання в широкому діапазоні навантажень [3].

Метою даної роботи є підвищення ефективності, стабільності та екологічності роботи головного суднового газового двигуна шляхом застосування форкамерно-факельного принципу запалювання.

Займання газоподібного палива в камері згорання дизеля можливо від додаткової свічки запалення (форкамерно-факельне запалення) за рахунок теплоти стискування газоповітряної суміші і від запальної дози дизельного палива.

Форкамера, розташована у кришці циліндра, оснащується окремою свічкою запалювання. У ній створюється початковий осередок згорання з багатою сумішшю. Через спеціальні канали полум'я у вигляді факелів проникає в основну камеру, ініціюючи займання збідненої газоповітряної суміші в декількох точках одночасно. Це забезпечує рівномірне та повне згорання суміші [4].

Перевагами форкамерно-факельного запалювання є:

- зменшення затримки займання та підвищення стабільності процесу горіння;
- зниження детонаційної чутливості двигуна;
- можливість роботи на бідніших сумішах, що зменшує витрату палива;
- зниження утворення оксидів азоту (NO_x) і вуглекислого газу (CO_2);
- підвищення ККД двигуна та ресурсу свічок запалювання.

При переході з дизельного палива на газоподібне, замість дизельної форсунки встановлюється взаємозамінна форкамера об'ємом $V_{\phi} = 20 \dots 35 \%$ від обсягу камери згорання, що призводить до зниження ступеня стиснення до рівня, що забезпечує бездетонаційне згорання газоподібного палива [5].

Форкамера (рис. 1), яка встановлюється на місце форсунки в кришці циліндра 11 двигуна, при цьому остання містить канал 10 для відводу палива через форсунку і порожнину охолодження 12, складається з корпусу 2 з робочою порожниною 3, розпилювачем 1 і вирізом 9, свічки запалювання 5, вузла форкамерного клапана 4, свердлення 6 корпусу форкамери 2, дроселя 7 та фільтруючої сітки 8.

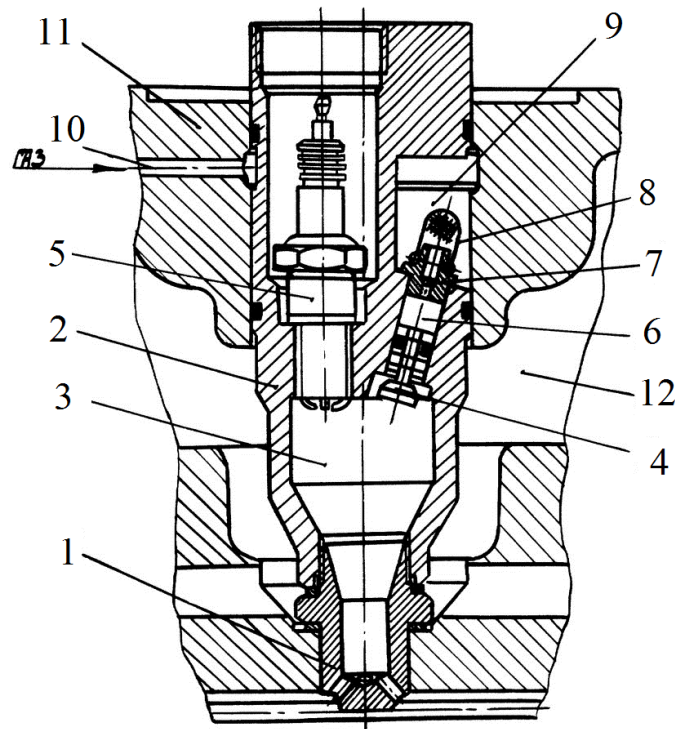


Рис. 1. Форкамера: 1 – розпилювач; 2, 9 – корпус; 3 – робоча порожнина; 4 – вузол форкамерного клапана; 5 – свічка запалювання; 6 – свердлення; 7 – дросель; 8 – фільтруюча сітка; 10 – канал; 11 – кришка циліндра; 12 – порожнина охолодження

Принцип роботи запропонованої форкамери аналогічний традиційним конструкціям. Відмінність полягає в тому, що вузол форкамерного клапана 4, який встановлений в свердленні 6 корпусу форкамери 2, в зоні, що омивається рідиною порожнини охолодження 12 кришки циліндра 11, що забезпечує його задовільний температурний стан і високу працездатність. Фільтруюча сітка 8 має комірки меншого розміру, ніж розмір отвору в дроселі 7, що виключає засмічення дроселя при роботі. Корпус форкамери 2 виконаний з матеріалу з високою теплопровідністю, що дозволяє забезпечити інтенсивне відведення тепла із зони установки свічки запалювання 5 і вузла форкамерного клапана 4, а також знижує теплонапруженість розпилювача 1. Підвищена міцність матеріалу корпусу форкамери 2 забезпечує багаторазову заміну свічки запалювання 5 без пошкодження різьблення корпусу 9 форкамери 2. Паливний газ з магістралі подачі форкамерного газу (не показаний) надходить в канал 10 кришки циліндра 11, призначений для відводу палива через форсунку палива в дизелі, далі газ надходить в виріз 9 корпусу форкамери 2, проходить через фільтруючу сітку 8, дросель 7, свердлення 6, далі через вузол форкамерного клапана 4 і надходить у робочу порожнину 3. В якості магістралі подачі форкамерного газу може бути використаний колектор збору палива, що просочилося через форсунки дизеля.

Потужний факел, що викидається з форкамери, дозволяє отримати стійкий робочий процес навіть на режимах холостого ходу і малих навантаженнях.

Висновки. 1. Запропоноване удосконалення системи запалювання на основі форкамерно-факельного принципу забезпечує покращення економічних та екологічних характеристик головного суднового газового двигуна. 2. Реалізація цієї системи може бути рекомендована як напрям модернізації існуючих енергетичних установок морського флоту.

Список літератури

- [1] Двигуни внутрішнього згорання. Теорія [Текст]: Підручник / В.Г. Дяченко. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – 488 с.
- [2] Woodyard D. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Eighth edition. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, 2004. – 914 p.
- [3] Stone R., Introduction to Internal Combustion Engines. 4th ed. London: Palgrave Macmillan, 2012. – 480 p.
- [4] Гутаревич Ю.Ф. Випробування двигунів внутрішнього згорання: навчальний посібник / Ю.Ф. Гутаревич, А.О. Корпач, А.Г. Говорун. – К.: НТУ, 2013. – 249 с.
- [5] Heywood J., Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. – 1050 p.

Poznanskyi A., Bondar M., Kapura I., Kyrychenko O., Medvediev O.

Improvement of the ignition system of a marine gas engine using the prechamber-flame principle

The improvement of the ignition system of the main marine gas engine using the prechamber-flame principle is considered. The prechamber design ensures reliable ignition of the mixtures, increases combustion stability, and reduces harmful emissions. This contributes to enhanced efficiency and environmental safety of marine power plants.

Keywords: prechamber, gaseous fuel, efficiency, ignition system, marine gas engine.

УДК 62-242

МІЦНІСТЬ ПОРШНЮ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Ткач М. Р.,

д. т. н., професор,

завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

mykhaylo.tkach@gmail.com

Золотий Ю. Г.,

завідувач лабораторії кафедри інженерної механіки та технології машинобудування

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова,

goldspekl@ukr.net

Галинкін Ю. М.,

к. т. н.,

викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

yurii.galynkin@nuos.edu.ua

Монахов А. А.,

аспірант кафедри інженерної механіки та технології машинобудування

*Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна
Monachow88@gmail.com*

Стрельченко Е. С.,
*магістрант кафедри інженерної механіки та технології машинобудування
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна
esstre12@gmail.com*

Анотація. У межах цього дослідження здійснено деталізоване визначення спектру власних коливань та відповідних резонансних частот для поршня, що використовується у мотоциклетних двигунах, який характеризується діаметром 52 мм і висотою 67 мм. Дослідження було виконане двома взаємодоповнюючими шляхами. По-перше, застосовувався інноваційний експериментальний метод електронної спеклінтерферометрії реального часу, який надав можливість безпосередньо зафіксувати ряд істинних форм коливань для конкретного зразка, враховуючи його унікальні технологічні особливості та матеріал. По-друге, паралельно була розроблена твердотільна віртуальна модель поршня, використовуючи ліцензійний програмний комплекс SolidWorks, що дозволило визначити аналогічні форми власних коливань шляхом чисельного комп'ютерного моделювання. На основі порівняльного аналізу отриманих результатів, було однозначно встановлено критичну важливість і високу ефективність комбінування високоточних експериментальних методів вимірювання із сучасними засобами чисельного розрахунку для отримання максимально достовірних і верифікованих результатів.

Ключові слова: власні коливання, частоти коливань, поршень, електронна спеклінтерферометрія, комп'ютерне моделювання.

Вступна частина. Поршні, які є ключовими елементами кривошипно-шатунного механізму (КШМ) в більшості двигунів внутрішнього згоряння та об'ємних компресорів, є найбільш навантаженими деталями. Вони піддаються постійній дії комплексу періодичних навантажень: газодинамічних сил, сил інерції (залежних від частоти обертання колінчастого валу) та сил контакту при перекиданні. Сукупність цих циклічних впливів індукує вібраційні процеси. Найбільша загроза виникає в режимі резонансу – при збігу частоти зовнішньої дії з однією з власних частот поршня. Це призводить до критичного зростання амплітуд коливань та різкого підвищення вібраційних напружень.

Наслідком резонансних коливань є формування втомних тріщин, які локалізуються в зонах найбільшої кривизни (максимальних напружень), що загрожує руйнуванням елементів поршня (юбка, дно). Таким чином, визначення форм і частот власних коливань поршня є критично важливим етапом проектування. Це дозволяє ідентифікувати небезпечні резонансні режими роботи, визначити найбільш вразливі місця і, відповідно, розробити необхідні конструктивні або експлуатаційні заходи для запобігання поломкам.

Метою роботи є експериментальне та теоретичне визначення форм і частот власних коливань поршня мотоциклетного двигуна.

Основна частина. Об'єктом досліджень обрано поршень мотоциклетного двигуна діаметром 52 мм та висотою 67 мм.

Експериментальне визначення було реалізовано за допомогою електронної спеклінтерферометрії реального часу. Дослідження проводилось на спеціалізованому, запатентованому обладнанні Національного університету кораблебудування [1], принципова схема якого наведена на рис. 1. Система використовує як джерело когерентного світла твердотільний DPSS-лазер 1 з потужністю випромінювання 50 мВт і довжиною хвилі $\lambda = 0,532$ мкм. Лазерний промінь, розширений мікролінзою 2, розділяється світлороздільником 3 на пропущений та відбитий компоненти.

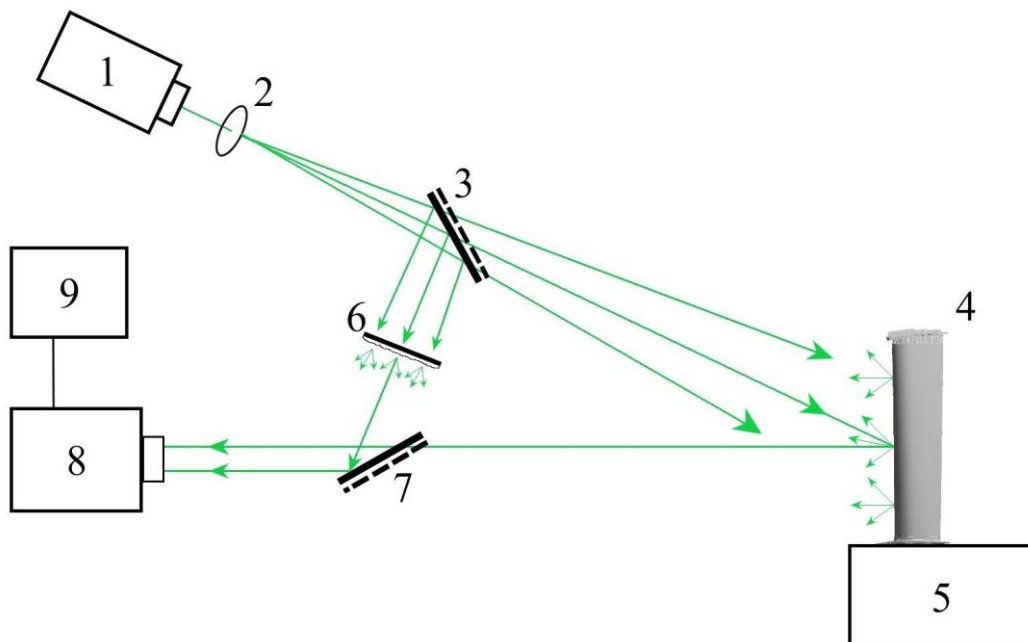


Рис. 1. Оптична схема експериментального стану:

1 – лазер; 2 – мікролінза; 3, 7 – світлороздільовачі; 4 – досліджуванний об'єкт; 5 – затискний пристрій; 6 – трансмісійний дифузор; 8 – відеокамера; 9 – персональний комп'ютер

Пропущений промінь використовується для освітлення поверхні досліджуваного об'єкта 4, який консольно закріплений у затискному пристрої 5. Розсіювання світла від поверхні об'єкта 4 формує дифузну предметну хвилю, необхідну для подальшого формування спеклінтерферограм.

Вібробудження досліджуваного об'єкта здійснюється за допомогою п'єзокерамічного віброперетворювача, що живиться синусоїдальним сигналом, посиленням підсилювачем низької частоти. Паралельно цьому, промінь світла, відбитий світлороздільником 3, проходить через пропускаючий дифузор 6, формуючи дифузну опорну хвилю. Об'єктний і опорний промені надалі зводяться світлороздільником 7 і об'єктивом камери 8, де утворюють результуюче спекл-

поле (спекклограмму) на світлочутливій матриці. Детальна інформація щодо схеми стенду та методології отримання й обробки голограм викладена у джерелі [2]. Результати проведеного експериментального дослідження представлені у вигляді ряду форм власних коливань, приклади яких ілюстровано на рис. 2.

Для узагальнення та верифікації експериментальних результатів використовується чисельне моделювання. Воно дозволяє налаштувати віртуальну модель відповідно до отриманих експериментально форм коливань, а також значно розширити діапазон досліджуваних режимів при суттєвій економії часових і ресурсних витрат на лабораторне обладнання. Моделювання виконується у ліцензійному програмному комплексі SolidWorks, який використовує метод кінцевих елементів (МКЕ) – чисельний метод, заснований на декомпозиції віртуальної твердотільної моделі на множину простих малих частин (елементів) для спрощення складних обчислювальних задач.

Поведінка кожного елемента за всіма можливими комбінаціями граничних умов та навантажень коректно описана математичними рівняннями у програмному комплексі SolidWorks. Метод кінцевих елементів використовує елементи різних форм. Діюча сила у будь-якій точці елемента інтерполюється з реакціями вузлів елементів. Кожен вузол повністю описується рядом параметрів, які залежать від типу виконуваного розрахунку та використовуваного елемента [3].

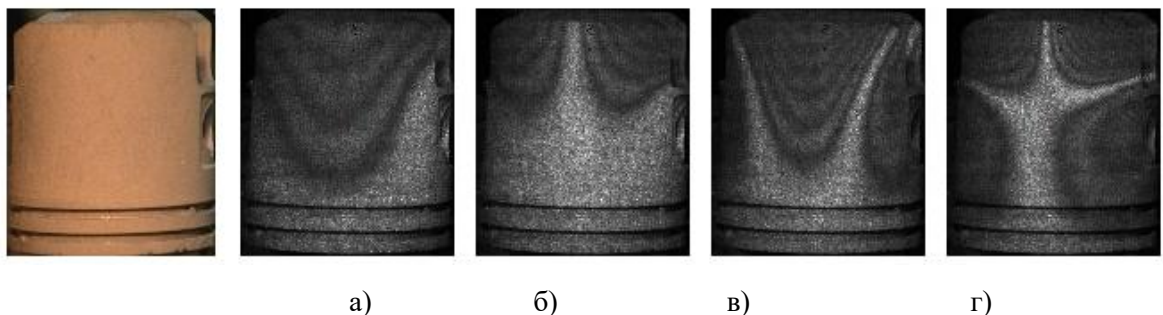


Рис. 2. Форми коливань поршня отримані експериментально, частота:

а) 4200 Гц; б) 7608 Гц; в) 8400 Гц; г) 9850 Гц

В основі цього процесу лежить метод кінцевих елементів (МКЕ), який використовує елементи різних геометричних форм. Сила, що діє в будь-якій внутрішній точці елемента, інтерполюється на основі реакцій його вузлів. Кожен вузол, повністю визначається набором параметрів (ступенів вільності), вибір яких залежить від типу чисельного розрахунку, що виконується, та конфігурації використовуваного елемента. Результатом досліджень є ряд форм, деякі з них наведено на рис. 3, всього у діапазоні 50...10000 Гц отримано 4 форми коливань.

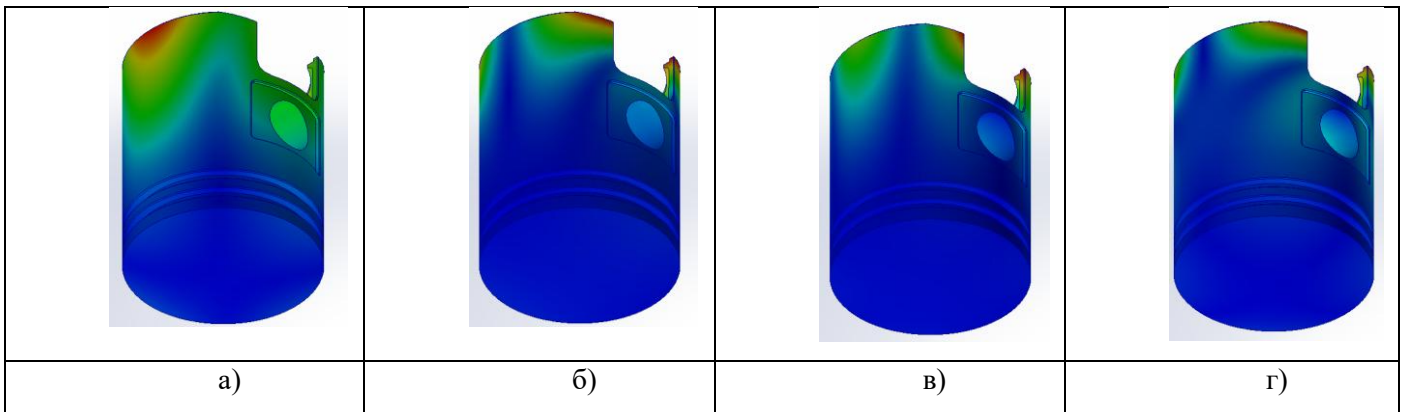


Рис. 3. Форми коливань поршня отримані шляхом розрахунку у програмному комплексі Solidworks

Висновки. Експериментально було отримано низку власних форм коливань та визначено відповідні їм частоти у діапазоні 50–10000 Гц. Ці дані мають вирішальне значення, оскільки дозволяють ідентифікувати найбільш небезпечні зони щодо появи тріщин та встановити критичні резонансні режими роботи компресора. Перевага експериментальних методів полягає у можливості фіксації реальних форм коливань безпосередньо для досліджуваного об'єкта, враховуючи його технологічні відхилення та неізотропність матеріалу. Паралельно була побудована твердотільна модель досліджуваного поршня на основі його робочих креслень. За допомогою цієї моделі виконано чисельне моделювання з метою визначення власних форм коливань у тому ж діапазоні частот для порівняння та верифікації. Доведено, що найвища достовірність результатів при визначенні частот і форм коливань досягається шляхом комбінування експериментальних методів – зокрема, електронної спекліінтерферометрії реального часу – із числовими розрахунками, які виконуються у сучасних комп'ютерних системах, таких, як SolidWorks.

Література

- [1] Tkach M.R., Zolotiy Yu.G., Dovgan D.V., Guk I.Yu. (2015), Patent: Method of determining of forms of resonant vibrations shapes of blades of gas turbine engine by speckle interferogram, UA 103068.
- [2] Tkach, M., Morhun, S., Zolotoy, Y., Zhuk, I. (2020), Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method. Int. J. Turbo Jet-Eng. <https://doi.org/10.1515/tjj-2020-0014>
- [3] SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (Дата звернення: 12.12.2023)

THE STRENGTH OF A PISTON UNDER DYNAMIC LOADING CONDITIONS

Tkach Mykhailo, Zolotoy Yuriy, Halynkin Yurii, Andriy Monakhov, Eduard Strelchenko

Abstract. Within the scope of this research, a detailed determination of the natural frequency spectrum and corresponding resonant frequencies was executed for a motorcycle engine piston, characterized by a diameter of 52mm and a height of 67 mm. The investigation was conducted through

two complementary approaches. Firstly, the innovative experimental method of real-time electronic speckle pattern interferometry (ESPI) was applied, providing the capability to directly record a series of true mode shapes for the specific test specimen, accounting for its unique manufacturing tolerances and material anisotropy. Secondly, a precise solid-body virtual model of the piston was developed utilizing the licensed software package Solidworks, which enabled the determination of analogous natural mode shapes via numerical computer modeling. Based on the comparative analysis of the derived results, it was unequivocally established that the critical importance and high efficiency of combining high-precision experimental measurement methods with modern numerical calculation tools are essential for obtaining maximally reliable and verified outcomes.

УДК 621.45.034

ОБГРУНТУВАННЯ ДІЛЬНИЦЬ ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НАПРЯМНИМИ ЛОПАТКАМИ В ОСЬОВИХ КОМПРЕСОРАХ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Б. А. Беков, аспірант¹, А. П. Шевцов, д. т. н., професор²,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова м. Миколаїв,
Україна,

¹bohdan.biekov53@gmail.com, ²aootnet@ukr.net

Анотація. Обґрунтовано спосіб застосування випарного охолодження на поверхнях напрямних лопаток осьових компресорів з урахуванням насичення вологого стисненого повітря, його температури та тиску. Запропоновано ефективні ділянки проточної частини осьових компресорів для раціональної реалізації стиснення вологого повітря з його охолодженням.

Ключові слова: стиснення, вологе повітря, температура, тиск, точка роси.

Вступна частина. Основними процесами, які значно обмежують економічну ефективність сучасних газотурбінних двигунів, є процеси стиснення в компресорах [1, 2]. Реалізація охолодження повітря при його стисканні є напрямом, що сприяє подоланню цих обмежень [3–6]. На сьогоднішній час запропоновано низку способів, частина яких реалізована та свідчить про доцільність напрямку. У той же час залишаються значні резерви зниження енергетичних витрат на привід компресора, пов'язані з граничним насиченням повітря вологою при випарному ступінчастому охолодженні.

Основна частина. При стисканні вологого повітря температура його точка роси, нижче за яку при тиску в ступені починається конденсація парів, підвищується по проточній частині компресора, оскільки маса водяної пари в одиниці об'єму повітря збільшується. З урахуванням цього виконано дослідження впливу початкової вологості повітря в межах її відносних величин від 30 до 90 % для початкових температур повітря від 10 до 40 °С. Умови процесів стиснення характеризувалися показником політропи в межах 1,1...1,3 і витратою води для випаровування на поверхні направляючих лопаток.

З метою визначення ефективних ділянок випарного охолодження на направляючих лопатках осьового компресора газотурбінного двигуна виконана оптимізація багатокритеріальної цільової функції методом згортки [7]. За цільову функцію ефективності процесів стиснення компресора була прийнята залежність роботи на привід компресора від регулюючих та незалежних експлуатаційних показників з урахуванням випарного охолодження.

Отримані основні результати, що представлені нижче.

В умовах роботи компресора низького тиску досягнення температури точки роси мало ймовірно, а в умовах роботи компресора високого тиску досить реальне при тиску більше 7×10^5 Па в залежності від рівня початкової вологості повітря і рівня охолодження.

Усунення ймовірності конденсації пари води в ступенях компресору високого тиску можливо шляхом поступеневого дозування витрати води для випарного охолодження на кожній ступені. Це забезпечується умовами, коли кінцева температура вологого повітря при стисканні з випарним охолодженням в межах ступені буде підвищуватися так, щоб на 3–7 градусів бути вищою за значення температури точки роси.

Залежність загального зниження роботи на привід компресора від початкової вологості повітря впливає на рівень ефективності випарного охолодження, але не змінює її закономірність зі зміною величини ступеня стискання, коли ефективність випарного охолодження зменшується з підвищенням ступеня стискання.

Наведені значення зниження енергетичних витрат на привід компресора, що обмежені насиченням повітря вологою при випарному ступінчастому охолодженні, дозволяють підвищити економічну ефективність газотурбінного двигуна від 4 до 18 %.

Висновки.

1. Визначені можливості використання випарного охолодження на поверхнях направляючих лопаток осьових компресорів газотурбінних двигунів у діапазоні початкової вологості оточуючого повітря від 30 до 90 % та початкових температур від 10 до 40 °С.

2. Обґрунтовано граничні значення стискання повітря в ступенях компресора за відсутності конденсації пари води в вологому повітрі для різних умов випарного охолодження, що характеризуються показниками політропи в діапазоні 1,1...1,3.

3. Визначені ефективні ділянки проточної частини осьового компресора з урахуванням регульованих та незалежних експлуатаційних показників процесу стискання з випарним охолодженням.

4. Отримано базу даних щодо поступеневого дозування витрати води для випарного охолодження на кожній ступені компресору за умовою відсутності конденсації.

5. Отримані розрахункові оцінки граничного підвищення економічної ефективності газотурбінного двигуна на рівні 4–18 %.

Список літератури

- [1] Дяченко, В. О., Бойко, І. М. (2021). Сучасний стан та проблеми розвитку газотурбінної енергетики в Україні. *Енергетичний журнал*, №3, С. 15 – 27.
- [2] Кузьменко, А. О. (2021). *Теорія і практика випарного охолодження в газотурбінних установках*. Київ: НТУУ КПІ.
- [3] Долгов, О. М., Бойчук, С. П. (2023). Оптимізація процесів охолодження повітря в компресорах газотурбінних установок. *Вісник ТЕІ*, №1, С. 77 – 89.
- [4] Patel, R., Singh, M. (2021). Evaporative Cooling for Gas Turbines: Performance Enhancement and Economic Benefits. *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, Issue 9, pp. 1234 – 1251.
- [5] Ivanov, P., Petrov, A. (2021). Evaporative Cooling in Gas Turbines: Experimental and Computational Study. *Journal of Turbomachinery*, Vol. 143, pp. 1 – 15.
- [6] Радченко, А. М., Цзунмин, Ю., Портной Б. С. (2019). Аналіз ефективності помірного та глибокого повітряного охолодження на вході газотурбінної установки в різних кліматичних умовах. *Холодильная техника и технологии*, 55(1), С. 34 – 39. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i1.1351>.
- [7] Згуровський, М. З., Панкратова, Н. Д. (2007). *Основи системного аналізу*. К.: Видавнича група BVH.

Biekov B. A., Shevtsov A. P.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

Justification of evaporation cooling sections of axial compressors guide vane of gas turbine engines

Abstract. This paper substantiates a method for applying evaporative cooling to the guide vane surfaces of axial compressors, considering the saturation, temperature, and pressure of the compressed moist air. Effective regions of the axial compressor flow path are identified for the optimal implementation of moist air compression with simultaneous cooling.

Keywords: compression, moist air, temperature, pressure, dew point.

УДК 620.178.5

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУДНОВОГО НАСОСНОГО УСТАТКУВАННЯ

Свиридов В. І.,

к. т. н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики
Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

viacheslav.svyrydov@nuos.edu.ua

Верзун Р. Р.,

магістрант гр. 5220м,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

romcjverzun@gmail.com

Анотація Робота насосного устаткування супроводжується вібраціями і своєчасне виявлення можуть допомогти забезпечити надійність цих засобів.

Розробка методів вібродіагностики насосного устаткування, як і будь-яких механізмів та обладнання, включає групу послідовних завдань у просторі станів; виявлення найбільш чутливих

до поширених дефектів діагностичним параметром для діагностики у просторі ознак. Своєчасне визначення меж зміни параметрів стану та сигналу та інших складових.

Ключові слова: устаткування, підшипникові вузли, вібраційні показники, діагностичні признаки та діагностичні параметри.

У роботі під насосним устаткуванням маються на увазі насоси відцентрового типу з електроприводом. Електроприводом в основному можуть бути застосовані як електричні машини змінного струму асинхронні електродвигуни, так і електричні машини постійного струму, але основним вузлом у них є ротор, що обертається. Відомо, що робота насосного устаткування супроводжується вібраціями, гідравлічного та механічного походження. Практично всі види дефектів, визначаючих ресурс цього обладнання, в процесі експлуатації змінюють параметри сигналу вібрації і тому вони можуть бути основними при виявленні дефектів механічних вузлів, магнітних ланцюгів і потокових вузлів.

Успішне використання сигналу вібрації для вирішення діагностичних завдань можливе лише в тому випадку, якщо вибираються діагностичні ознаки і параметри дозволяють встановити зв'язок технічного стану з діагностичним параметром, близьку до детермінованої, що забезпечується за умови сильної залежності параметра від стану об'єкта і слабкої від зовнішніх умов.

Розробка методів вібродіагностики насосного устаткування, як і будь-яких механізмів та обладнання, включає групу послідовних завдань, у тому числі: опис об'єкта діагностики мінімальною сукупністю параметрів стану; встановлення кількісного зв'язку між параметрами стану та діагностичних параметрів для діагностики у просторі станів; виявлення найбільш чутливих до поширених дефектів діагностичним параметром для діагностики у просторі ознак; визначення меж зміни параметрів стану та сигналу; розподіл безлічі станів на класи та інші складові.

Одночасно необхідно вирішувати задачі вимірювання діагностичних параметрів, створення спеціалізованих діагностичних приладів та систем, забезпечення контролю спроможності об'єкта діагностики.

Доцільно будь-який об'єкт діагностування розглядати як складну технічну систему, що представляє впорядковану сукупність кількості спільно діючих елементів (агрегатів, вузлів, та інших деталей) і призначену для виконання заданих функцій. Залежно від конструктивного виконання (горизонтального чи вертикального розташування агрегату) та кріплення його до фундаменту (через проміжну платформу чи через віброізолятори встановлених на фундаменті) кожне, навіть однотипне насосного устаткування має свої індивідуальні вібраційні параметри (характеристики), що ускладнюють їх використання для діагностичних цілей.

На етапі опису об'єкта діагностики сукупністю параметрів стану або діагностичних параметрів, доцільно насосне устаткування представити графом причинно-наслідкових зв'язків.

Упорядкування графа причинно-наслідкових зв'язків об'єкта діагностування є першим етапом побудови діагностичної моделі. Таке уявлення дозволяє у вигляді встановити наявність і вид взаємозв'язків між функціональними і структурними параметрами, і навіть їх зовнішніми ознаками і, отже, між станами і діагностичними сигналами.

Безліч станів при цьому визначається дефектами і несправностями вузлів об'єкта, що діагностується.

Висновки. Таким чином, для функціональної оцінки технічного стану насосного устаткування доцільно використовувати параметричний метод діагностування, в якому основним є вібраційний метод, і як додаткові діагностичні параметри використовуються разом з іншими параметри функціонування, такими як температура, натиск, струм навантаження та ін.

Література

- [1]. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. № 1(62). С.50–60.
- [2]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.
- [3]. Костишин В. С., Яремак І. І. Математична модель надійності та ефективності роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції Науковий вісник Національного гірничого університету. 2017. № 5(161). С. 62–68.
- [4]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.
- [5]. Яремак І. І., Костишин В. С., Костишин А. В. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. № 27(3). С.166–170. 13.
- [6]. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.

PHYSICAL AND TECHNICAL ANALYSIS OF THE FUNCTIONING PROCESSES OF SHIP PUMPING EQUIPMENT

Svyrydov Viacheslav

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Power Engineering, Educational and Scientific Institute, National Shipbuilding University named after Admiral Makarov, Mykolaiv, Ukraine

Vezun Roman

Master's student, 5220m

Kherson Educational and Scientific Institute

Admiral Makarov National Shipbuilding University, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. *Vibrations and their timely detection accompany the operation of pumping equipment, which can help ensure the reliability of these facilities. The development of methods for vibration diagnostics of pumping equipment and any mechanisms and equipment includes a group of sequential tasks in the state space; detection of the most sensitive to common defects by a diagnostic parameter for diagnostics in the space of features, timely determination of the limits of change of state and signal parameters, and other components.*

Keywords. *Equipment, bearing units, vibration indicators, diagnostic features, and diagnostic parameters.*

УДК 620.178.5

**ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ ЗНОШУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ КОЧЕННЯ НА
НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ*****Свиридов В. І.,***

*к. т. н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики
Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна
viacheslav.svyrydov@nuos.edu.ua*

Анотація. Дефекти зносу поверхонь кочення можуть впливати і низькочастотні, і високочастотні складові вібрації механізмів. При розцентруванні та прогинанні ротора насосного обладнання значно збільшується вібрація на другій гармоніці частоти обертання, при ослабленні щільності посадки вузлів ротора та загальному ослабленні кріпильних деталей. Але основним дефектом ротора є його невірноваженість, яка зростає при збільшенні частоти обертання ротора.

Ключові слова: устаткування, підшипники ковзання, частота обертання, розцентрування, вібрація, діагностика.

Дефекти зносу поверхонь кочення можуть впливати і низькочастотні, і високочастотні складові вібрації механізмів. Вплив на високочастотні складові полягає не тільки в тому, що в процесі зносу збільшується коефіцієнт тертя кочення та інтенсивність випадкової вібрації, що створюється силами тертя, але й у тому, що при взаємодії дефектних поверхонь кочення виникають періодичні удари, що супроводжуються зростанням інтенсивності як вищих гармонік, так і випадкових вібрації складових механізму.

Вплив дефектів зносу на низькочастотну вібрацію підшипників котіння і насосного обладнання загалом проявляється і натомість впливу дефектів виготовлення відразу після їх виникнення, лише після того, як величина дефекту зносу перевищить величину дефекту виготовлення, тобто. на одному з останніх етапів експлуатації підшипника, що характеризується високою швидкістю зношування.

Складний склад спектра сил, що змушують, може призвести до того, що через резонанси окремих вузлів механізму інтенсивність ряду гармонік вібрації, створюваних силами ударного збудження і збігаються з резонансними частотами, різко зростає і може визначати рівень вібрації механізму. На дефекти ротора насосного обладнання впливає розбалансування, розцентрування, порушення щільності посадки окремих вузлів ротора, що відбуваються під дією тривалого впливу змінних сил і призводять до збільшення вібрації, насамперед на частоті обертання насосного обладнання.

При розцентруванні та прогинанні ротора насосного обладнання значно збільшується вібрація на другій гармоніці частоти обертання, при ослабленні щільності посадки вузлів ротора та загальному ослабленні кріпильних деталей.

Але основним дефектом ротора є його невірноваженість, яка зростає при збільшенні частоти обертання ротора.

Відомо, що невірноваженістю ротора, що розглядається як абсолютно тверде тіло, називається розбіжність його головної, центральної осі інерції з віссю обертання. Залежно від розподілу мас ротора розрізняють невірноваженість трьох видів: статичну; моментну; динамічний, а також дисбаланс ротора.

Статична невірноваженість ротора має місце, коли головна вісь інерції проходить через центр мас ротора, залишаючись паралельною осі обертання.

У цьому випадку всі невірноважені сили інерції, приведені до центру мас ротора, що обертається, дають тільки головний вектор, головний момент дорівнює нулю. Така невірноваженість може бути виявлена без обертання ротора, наприклад, на паралелях. При обертанні симетричного ротора в цьому випадку до підшипників прикладені дві рівні і однаково спрямовані сили, що обурюють.

Моментна невірноваженість ротора виникає, коли головна вісь інерції перетинає вісь обертання у центрі мас. У цьому випадку всі невірноважені сили інерції, приведені до центру мас ротора, що обертається, дають тільки головний момент, головний вектор дорівнює нулю. Ця невірноваженість виявляється тільки при обертанні ротора, коли виникає обурливий момент, що викликає обертальні коливання ротора щодо поперечної осі, що проходить через центр мас.

Динамічна невірноваженість ротора характеризується наявністю одночасно статичної та моментної невірноваженості ротора. У загальному випадку головний вектор і головний момент знаходяться в різних осьових площинах ротора, а обурювальні сили, що викликаються ними, додані до підшипників в будь-якій осьовій площині, зсунуті по фазі. Вісь ротора та її головна, центральна, вісь інерції перетинаються над центрі мас чи перехрещуються.

Дисбалансом називається вектор, рівний добутку невірноваженої маси на радіус-вектор її центру щодо осі ротора, який називається ексцентриситетом центру маси.

Висновки. У багатьох типах механізмів сили тертя в підшипниках є причиною появи інтенсивної випадкової вібрації, що робить помітний внесок у загальний рівень вібрації механізму. Вібрація, створювана силами тертя у механізмах, на вирішення багатьох практичних завдань то, можливо представлена стаціонарним випадковим сигналом з нормальним законом розподілу. Кількісна оцінка випадкової вібрації залежить від спектральної щільності або рівня вібрації від параметрів підшипників та частоти.

Література

[1]. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. № 1(62). С.50–60.

[2]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.

[3]. Костишин В. С., Яремак І. І. Математична модель надійності та ефективності роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції Науковий вісник Національного гірничого університету. 2017. № 5(161). С. 62–68.

[4]. Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики: Монографія. В.П. Бабак та ін., за ред. В.П. Бабака. К., Ін-т техн. теплофізики НАН України, 2015, 512 с.

[5]. Яремак І. І., Костишин В. С., Костишин А. В. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. № 27(3). С.166–170. 13.

[6]. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.

INFLUENCE OF WEAR DEFECTS OF ROLLING SURFACES ON THE RELIABILITY OF PUMPING EQUIPMENT

Svyrydov Viacheslav

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Power Engineering,
Educational and Scientific Institute, National Shipbuilding University named after Admiral Makarov,
Mykolaiv, Ukraine

Abstract. Defects of wear of rolling surfaces can affect the low-frequency and high-frequency components of the vibration of mechanisms. When the rotor of pumping equipment is out of center and deflected, the vibration at the second harmonic of the rotation frequency increases significantly, with a weakening of the density of the rotor nodes and a general weakening of the fasteners. However, the primary defect of the rotor is its imbalance, which increases with increasing rotor rotation frequency.

Keywords. Equipment, plain bearings, rotation frequency, out of center, vibration, diagnostics

УДК 629.5.07:629.546.2

МОДЕРНІЗАЦІЇ ПРОПУЛЬСИВНОЇ УСТАНОВКИ БАЛКЕРА

Дудар О. Ю.,

студ. гр. 6211м

*кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна*

Анотація. Робота пов'язана з питаннями використання технологій зниження буксирувального опору корпусу судна, зокрема систем повітряного змащення – ALS. Розглянуті різні типи систем ALS які можуть бути використані на цьому типі суден. Окреслено ключові компоненти та конструктивні особливості для забезпечення ефективної роботи системи. Пропонується при модернізації балкера «Dietrich Oldendorff» встановити в ALS Silverstream® укомплектовану безмасляними компресорами.

Ключові слова: балкер, повітряне змащення, безмасляний компресор, зниження буксирувального опору.

Системи повітряного змащення – це технологія, що забезпечує зменшення опору корпусу корабля за рахунок формування прошарку з повітряних бульбашок. Утворений на поверхні корпусу шар бульбашок знижує буксировальний опір судна на 3–15 %, що сприяє

підвищенню ефективності пропульсивного комплексу судна. За даними класифікаційного товариства DNV, Air Bubble Lubrication System (ALS) є перспективною технологією, яка дозволяє підвищити екологічні показники суден що експлуатуються. Існує кілька варіантів реалізації таких систем, кожна з яких має особливий принцип функціонування і відповідно стикається з різними технічними викликами.

Системи мікропухирцевого мащення полягає у впорскуванні бульбашок повітря в прикордонний шар судна. На підставі експериментів показано, що подача бульбашок дає значне зниження опору тертя, але тільки на обмеженій довжині вниз за течією.

Системи зовнішньої повітряної порожнини створюють повітряні порожнини, як правило, займають частину днища судна. Ці системи вимагають відносно невеликої подачі повітря. Прикладом такої є ALS є рішення компанії Damen (DACS) (рис. 1).

Damen Air Cavity System [1] – була розроблена у співпраці з Делфтським технологічним університетом. Технологія запатентована у всьому світі. DACS зменшує площу змочування судна. Це досягається шляхом створення стійких повітряних кишень, що відокремлюють корпус від води.

Damen Shipyard вивела технологію на ринок, в співробітництві з науковими центрами MARIN та HSVA [1, 2]. В системі DACS повітряна порожнина створюється в результаті нагнітання повітря під судно за невеликим кавітатором, який відокремлює потік води від корпусу.

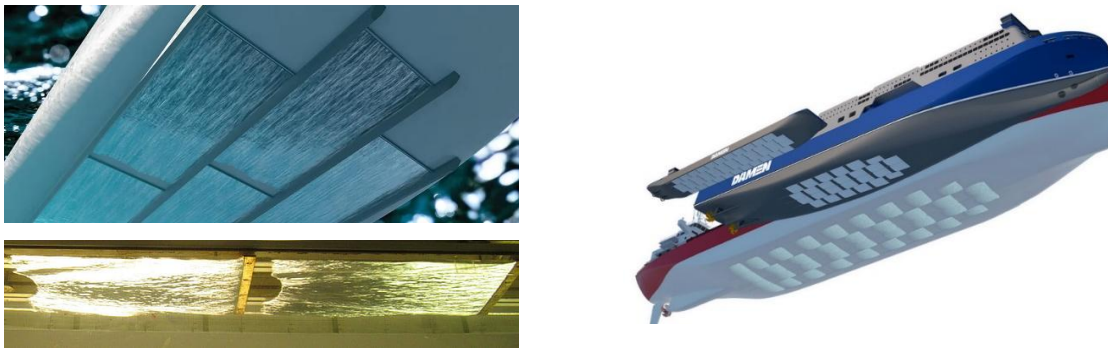


Рис.1. Damen Air Cavity System [1]

Для локалізації порожнини встановлюються поздовжні скегі, які запобігають витоку повітря. Нагнітаючим компресорам потрібно лише подолати гідростатичний тиск, спричинений осадкою судна. Внаслідок цього метод повітряної порожнини вимагає значно меншої потужності компресора, ніж системи першого покоління.

Щоб максимізувати площу корпусу, що охоплюється системою, створюється ряд послідовних порожнин, розділених поперечними скегами, які забезпечують збереження морських якостей. Наявність ряду порожнин на місці має додаткову перевагу, що полягає в тому, що будь-яке повітря, що виходить з однієї порожнини, поглинається в наступній.

Silverstream ALS. В 2010 року компанія Silverstream [3] розробила, та впровадила технологію повітряного мащення, що зробило систему Silverstream® основним вибором для судноплавної галузі (рис. 2).

З інженерної точки зору система Silverstream® проста в інтеграції в новий проєкт або модернізації існуючого судна. Модернізації зазвичай можуть бути завершені протягом шести місяців з моменту замовлення та встановлені під час запланованих сухих доків.

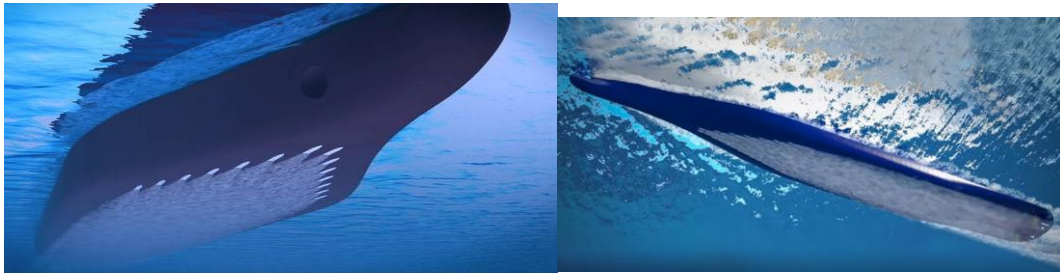


Рис. 2. Silverstream Technologies

Фахівці компанії виконують оцінку очікуваної економії та розробляють проєкт системи. На додаток до проєктних креслень надаються докладні плани для виготовлення та постачання обладнання, а також супровід етапу встановлення системи та введення в експлуатацію судна.

Система ALS Silverstream використовує компресори для подачі повітря системою труб і клапанів до блоків випуску повітря (ARU), розташованим уздовж корпусу судна. ARU дозволяють повітрю попадати у воду, створюючи килим із бульбашок під корпусом судна.

Виникають побоювання, що бульбашки повітря, які переміщуються вздовж корпусу, потрапляють на гвинт судна. Це може вплинути на ефективність, шум і вібрацію гвинта, але згідно з експериментами, проведеними компанією «Mitsubishi», вплив бульбашок повітря на гвинт є незначним [4].

Вагому роль в роботі ALS відіграють повітряні компресори, оскільки при роботі система витрачає значні об'єми стислого повітря. Чим більше осадка судна, тем вище тиск повітря, тим більше потужності потрібно для роботи системи. Енергоспоживання компресорів має бути враховане при проєктуванні системи. Важливим, є використання саме «Oil Free», компресорів, які виключають присутності мастила в повітрі що видається під днище. Такі компресори для ALS пропонуються компанією «TCM Compressor» [5]. Слід зазначити, що все більше судновласників вдаються до модернізацій свого флоту, що б відповідати екологічним нормам та лишатись на легальному ринку морських перевезень [6].

Висновок.

Системи ALS можуть бути запропонована як для модернізації вже діючих суден так і для тих що проєктуються. Тож можна сказати, що напрямок подібних модернізацій є необхідним та перспективним.

Для балкера «DIETRICH OLDENDORFF» доцільним є використання системи повітряного змащення корпусу судна «Silverstream» з компресорною установкою фірми «TCM Compressor». Ця система має забезпечити економію палива на 5–10 відсотків та зменшити об'єм шкідливих викидів СЕУ.

Література:

1. Damen Shipyards Group. (n.d.). *Home*. <https://www.damen.com>
2. MARIN. (n.d.). *Air lubrication*. <https://www.marin.nl/en/research/air-lubrication>
3. Silverstream Technologies. (n.d.). *Air lubrication technology*. <https://www.silverstream-tech.com/>
4. Mitsubishi Heavy Industries. (2010). *Mitsubishi air lubrication system (MALS) for energy saving* [Technical Review]. <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e473/e473041.pdf>
5. TMC Compressors. (n.d.). *Marine compressors*. <https://www.tmc.com/>
6. Орлов, М. В. (2023). Розробка системи повітряного змащення корпусу судна газовозу «BW Tulip». *Суднова енергетика: стан та проблеми* (с. 69–72). Видавець Ємельянова Т.В.

MODERNIZATION OF A BULK CARRIER'S PROPULSION PLANT

Dudar O.Yu.

Master's student, Group 6211M

Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The study addresses technologies for reducing a ship hull's towing resistance, with a focus on air lubrication systems (ALS). Various ALS types suitable for this vessel class are reviewed. Key components and design features required to ensure effective system performance are outlined. For the retrofit of the bulk carrier *Dietrich Oldendorff*, it is proposed to install the Silverstream® ALS equipped with oil-free compressors.

Keywords: bulk carrier, air lubrication, oil-free compressor, towing resistance reduction.

UDC 539.3

EXPERIMENTAL METHODOLOGY FOR THE GAS TURBINE ENGINE ROTORS FATIGUE STRENGTH STUDY

N. Smetankina,

*Dr. Sc., Professor, Department of Vibration and Thermostability Studies, Anatolii Pidhornyi
Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/4
Dmytra Pozharskogo Street, Kharkiv, Ukraine*

n.smetankina@ukr.net

S. Morhun,

PhD (Tech),

*Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Technology of
Machinebuilding, Admiral Makarov National University of Shipbuilding*

Mykolaiv, Ukraine

serhii.morhun@nuos.edu.ua

Abstract. *The method of the highly loaded gas turbine rotor fatigue strength experimental determination is described. Using the newly developed experimental methodology, an investigation for the impeller's section, consisting of a disk sector and a bandaged blade was held. The developed methodology takes into consideration the influence of the non-stationary gas flow, high temperature and the rotor rotation and vibration load. The results of the rotor fatigue strength study can be used for the rotor life cycle estimation.*

Key words: *gas turbine rotor, impeller, fatigue strength, vibration load, methodology.*

Experimental investigation was held to determine the endurance limit of the blades and disks. It was carried out by excitation of resonant mechanical vibrations of the research object along the first bending mode with a symmetrical loading cycle with cantilever clamping of the research object.

All experimental tests were carried out while maintaining vibration at a constant level of alternating stresses from the lowest stress level. Then we reach the level of alternating stresses at which the research object accumulated the base number of cycles, required by technical recommendation and then we reach the endurance limit after which the blades or disks destroy.

Experimental methodology was verified by the tests with cylindrical samples. Their geometric shape, dimensions and material were identical to these, given in paper [1, 2–4]. The divergence between the obtained experimental data given in paper [5] was less than 5 %.

In preparation for experiment the blades and disk were prepared with constantan wire strain sensors with base 3 mm and electrical resistance from verifying 77.2 to 78.0 Ohm. Sensors strain sensitivity is 1.65.

The sensors have been mounted at the areas of the blade feather and parts of the disk, where the highest dynamic stresses have been determined during the previous investigation.

The process of the fatigue stresses measuring is based on the conversion of electrical voltage, received from the sensors into the mechanical stresses, according to the following dependence:

$$U_i = 0,708 I_i S m \frac{q_i R_k R_i}{E(R_k + R_i)} \quad (1)$$

where U_i is the electrical resistance on the i -th sensor, mV; I_i – current strength at the input terminal of the i -th sensor; S – strain sensitivity coefficient; m – current amplification factor on sensor; q_i – the desired vibration stress at the installation site of the i -th sensor; E – Young's modulus of the material of the blade or disk under study; R_k – input electrical resistance of the measuring channel of sensor; R_i – electrical resistance of the sensor.

References.

- Duriagina, Z. A., Kulyk, V. V., Filimonov, O. S., Trostianchyn, A. M., Sokulska, N.B. The role of stress-strain state of gas turbine engine metal parts in predicting their safe life. *Progress in Physics of Metals*. 22(4), 643–677. (2021). <https://doi.org/10.15407/ufm.22.04.643>
- Skamniottis, Ch., Courtis, M., Cocks, C. F. A. Multiscale analysis of thermomechanical stresses in double wall transpiration cooling systems for gas turbine blades. *International Journal of Mechanical Sciences*. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijmec.sci.2021.106657>
- Sklepus, S.N. Numerical-and-Analytical Method for Creep Investigation in Functionally Graded Complex-Shaped Bodies of Rotation. *Strength Mater* 52, 235–242 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00170-1>
- Maktouf, W., Ammar, K., Ben Naceur, I., Sai, K. Multiaxial high-cycle fatigue criteria and life prediction: Application to gas turbine blade. *International Journal of Fatigue*. 92, 25-35. (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.024>

UDC 539.3

GAS TURBINE ENGINE ROTORS FORCED VIBRATION AND FATIGUE STUDY UNDER THE NON-STATIONARY THREE DIMENTION GAS FLOW INFLUENCE

S. Morhun,

PhD (Tech),

*Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Technology of
Machinebuilding, Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Mykolaiv, Ukraine*

serhii.morhun@nuos.edu.ua

D. Bushynskii, V. Lukyanenko

*Students, Department of Engineering Mechanics and Technology of Machinebuilding, Admiral
Makarov National University of Shipbuilding
Mykolaiv, Ukraine*

Abstract. *The method of the highly loaded gas turbine non-cooled impeller with damping links vibration research is described. Using the finite element method, a refined mathematical model was developed for the impeller's section, consisting of a disk sector and a bandaged blade. The developed mathematical model takes into consideration the structural heterogeneity of the blade itself and the disk. The results of the impeller vibration frequencies calculation, caused by the influence of non-stationary gas flow, can be used for the rotor stress-strain state calculation.*

Key words: *gas turbine rotor, impeller, forced vibration, vibration frequency, non-stationary gas flow.*

The development of a set of measures for the gas turbines reliability increase is not feasible without a detailed study of vibration processes occurring in such critical details as impellers, influenced

by non-stationary gas-dynamic forces of high temperature. However, as follows from the above analysis of recent research on this topic, some important aspects remain insufficiently illuminated, therefore, it is necessary to develop a refined mathematical model of the impeller forced vibration. It is also necessary to take into consideration the significant constructional heterogeneity of the impellers cooled blades. Therefore, the aim of this work is to develop a refined mathematical model of the marine gas turbine cooled impeller with damping links, based on the usage of finite elements method. Full description of the finite elements that are suitable for the impeller correct modeling is given in the works [1–6].

The task of the gas turbine impeller forced vibration amplitudes and frequencies determining is given. It is also assumed that the considered system of solid bodies (impeller) has the properties of cyclic symmetry. So it can be interpreted as a set of h subsystems (sections) with the same geometric, inertial and stiffness properties [7].

The finite element model of an impeller blade was built on the basis of superparametric curvilinear finite elements. Each of them consisted of 20 nodes with 5 degrees of freedom in every node. The damper links, connecting the blades in a unity were modeled using a rod finite element. The disk model included 230 first-order hexagonal finite elements with 1254 degrees of freedom totally [6].

In order to study the practical suitability of the developed mathematical model, calculations of the second stage gas turbine impeller forced vibration amplitudes and frequencies are calculated. As it is well-known, for the marine gas turbine engines there are two main constructional types of the impellers: an impeller with a disk having a central shaft hole and with a solid disk. The heterogeneity of the gas flow, which is the main source of the impeller forced vibration, was set by the deviation of the nozzle vanes installation angle from its nominal value. Also the unevenness of the twist angle along the blades height was taken into consideration. In addition, damping was taken into account at the points of contact between the blades, the blades and the disk and the blades and damper links.

References.

1. *Samaras C.* Emissions and lifetime estimation modeling of industrial gas turbines / C. Samaras // M. Sc. Progress Review, Cranfield University, UK, 2009. P. 30–35.
2. *Krishnakanth P. V.* Structural and Thermal Analysis of Gas Turbine Blade by using FEM / P. V. Krishnakanth, G. Narasa Raju et. al. // International Journal of Scientific Research Engineering and Technology. 2013 Vol. 2, Issue 2. P. 060–065.
3. *Mrinaline M.* Steady state structural analysis of single crystal turbine blade / M. Mrinaline // International Journal of Engineering Research and Technology. 2016. Vol. V5, Issue 10. P. 382–384. doi: 10.17577/ijertv5is100314
4. *Rzadkowski R.* Unsteady forces acting on the rotor blades in the turbine stage in 3D viscous flow in nominal and off-design regimes / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // Journal of Vibration Engineering, and Technologies. 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 89–95.
5. *Postnov V.V.* Theoretical and experimental stress-strain analysis of machining gas turbine engine parts made of the high energy structural efficiency alloy / V. V. Postnov, S. V. Starovoitov, S. Yu. Fomin, R. R. Basharov // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, Issue 5. P. 47–50.

6. Morgun S. The blades constructions finite elements models development / S. Morgun // Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New Solutions in Modern Technologies. 2016. Issue 42 (1214). P. 86–91. doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.14

7. Morhun S. The influence of the blade feather constructional inhomogeneity on the turbine cooling blades stress-strain state // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied Mechanics. 2018. Issue 2/7 (92). P. 11-17. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.125937.

UDC 539.3

GAS TURBINE ENGINE FLAME TUBES FREE VIBRATION STUDY

S. Morhun,

PhD (Tech),

*Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Technology of
Machinebuilding, Admiral Makarov National University of Shipbuilding*

Mykolaiv, Ukraine

serhii.morhun@nuos.edu.ua

M. Semenov,

*Lecturer, Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding*

Mykolaiv, Ukraine

mykola.semenov@nuos.edu.ua

Abstract. *The method of the highly loaded gas turbine flame tubes free vibration research is described. Using the finite element method, a refined mathematical model was developed for the flame tube section, consisting of a reinforced shell sector. The developed mathematical model takes into consideration the structural heterogeneity of the flame tube itself and the disk. The results of the flame tube free vibration, caused by the influence of non-stationary gas flow determination, can be used for its stress-strain state calculation.*

Key words: *gas turbine flame tube, free vibration, stress-strain state, non-stationary gas flow, vibration load.*

Achieving enhanced reliability in gas turbine engines necessitates an in-depth investigation into the vibratory phenomena present in critical components, specifically the flame tubes. These vibrations are induced by high-temperature, non-stationary gas-dynamic forces. Based on a review of recent literature concerning this subject, it is apparent that certain crucial aspects remain under-researched. Consequently, the development of a refined mathematical model for the free vibration of the flame tube is essential. It is also critical that the model adequately accounts for the significant structural heterogeneity inherent in the flame tube design. Therefore, the central objective of this research is the construction of an improved mathematical model for the marine gas turbine flame tube, leveraging the Finite Element Method (FEM). The works [1–7] contain a comprehensive description of the finite elements deemed suitable for the accurate modeling of the impeller.

The study is aimed at determining the amplitudes and frequencies associated with the free vibration of the gas turbine flame tube. It is presupposed that the analyzed system of solid bodies exhibits cyclic symmetry characteristics. The finite element representation of the flame tube was built upon the principles of superparametric curvilinear finite elements. Each element was defined by 20 nodes, with 5 degrees of freedom allocated at every node.

In order to study the practical suitability of the developed mathematical model, calculations of the gas turbine flame tube free vibration modes and frequencies are calculated. The heterogeneity of the gas flow, which is the main source of the flame tube vibration, was set by the deviation of the nozzle vanes installation angle from its nominal value.

References.

1. *Samaras C.* Emissions and lifetime estimation modeling of industrial gas turbines / C. Samaras // M. Sc. Progress Review, Cranfield University, UK, 2009. P. 30–35.
2. *Krishnakanth P. V.* Structural and Thermal Analysis of Gas Turbine Blade by using FEM / P. V. Krishnakanth, G. Narasa Raju et. al. // International Journal of Scientific Research Engineering and Technology. 2013 Vol. 2, Issue 2. P. 060–065.
3. *Mrinaline M.* Steady state structural analysis of single crystal turbine blade / M. Mrinaline // International Journal of Engineering Research and Technology. 2016. Vol. V5, Issue 10. P. 382–384. doi: 10.17577/ijertv5is100314
4. *Rzadkowski R.* Unsteady forces acting on the rotor blades in the turbine stage in 3D viscous flow in nominal and off-design regimes / R. Rzadkowski, V. Gnesin, L. Kolodyazhnaya // Journal of Vibration Engineering, and Technologies. 2014. Vol. 2, Issue 2. P. 89–95.
5. *Postnov V.V.* Theoretical and experimental stress-strain analysis of machining gas turbine engine parts made of the high energy structural efficiency alloy / V. V. Postnov, S. V. Starovoitov, S. Yu. Fomin, R. R. Basharov // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7, Issue 5. P. 47–50.
6. *Morgun S.* The blades constructions finite elements models development / S. Morgun // Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New Solutions in Modern Technologies. 2016. Issue 42 (1214). P. 86–91. doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.14
7. *Morhun S.* The influence of the blade feather constructional inhomogeneity on the turbine cooling blades stress-strain state // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Applied Mechanics. 2018. Issue 2/7 (92). P. 11-17. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.125937.

UDK 621.4:629.5

IMPROVEMENT OF THE WEIGHT AND SIZE INDEXES OF OFFSHORE GAS PRODUCTION PLATFORMS POWER PLANTS BY USING GAS TURBINE PLANTS WITH THERMOCHEMICAL WASTE HEAT RECOVERY

V. V. Kuznetsov, Doctor of Science (tech.), professor of the department¹,

O. K. Cherednichenko, Doctor of Science (tech.), professor²,

S. A. Kuznetsova, Candidate of Technical Science, associate professor³

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

¹ valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua, ² oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua

³ svitlana.kuznetsova@nuos.edu.ua

Abstract. A pressing problem for Ukraine is the limited capacity to produce natural gas to supply the domestic sector and industry. The presented materials summarize the results of studies aimed at substantiating the efficiency of thermochemical processing and the use of associated gas as a partial solution to this problem. It has been shown that when using gas turbine engines produced by JSC “Zorya-Mashproekt” with a capacity of 5–32 MW, the generation of synthesis gas can reach up to 0.17 kg/s per 1 MW of engine power. The paper justifies methods for reducing the weight and size characteristics of waste heat recovery boilers by intensifying heat transfer, primarily due to its predominant increase over hydrodynamic resistance.

Key words: offshore drilling platform, power plant, gas turbine engine, thermochemical heat recovery, waste heat recovery boiler, intensification.

The global trend toward energy independence and environmental efficiency increases interest in highly efficient heat recovery methods. For Ukraine, this issue is particularly relevant given the need to restore its industrial potential in the post-war period. Although the current volume of natural gas production meets the needs of the household sector, it is necessary to look for alternative energy sources for industry [1].

A promising path in this direction is the development of offshore gas production. This will require the simultaneous development of such technical means as offshore drilling platforms to implement this direction. Considering that Ukraine is home to one of the world’s leading manufacturers of gas turbine equipment, JSC “Zorya-Mashproekt”, gas turbine units are seen as promising power units for such platforms. An additional promising factor for implementing these systems is the possibility of processing associated gas into synthesis gas through **thermochemical utilization of exhaust gas heat**.

Through mathematical modeling, it was determined that for the existing power range of **5,000 to 32,000 kW** of serial gas turbine engines, the production of synthesis gas can reach **up to 0.17 kg/s per 1 MW of engine power**.

The process of thermochemical heat recovery is based on **steam reforming of methane**, which requires a significant amount of saturated steam. The main design challenge for implementing this process is the **large size of the waste heat recovery boiler**, which makes its placement difficult within the **space-limited engine compartments of offshore drilling platforms**.

To reduce the weight and size indexes of waste heat recovery boilers, options for **intensifying heat transfer processes** in the boilers were considered. This involves the use of various types of heat exchange surfaces, including: **round tubes with smooth spiral-strip fins** and **fins with dimpled systems** on their surfaces; **elliptical tubes with smooth flat fins** and **fins equipped with dimpled systems**. These design variations aim to enhance heat transfer efficiency while minimizing the overall dimensions of the waste heat recovery units.

The evaluation of the **dimensional indexes** of the waste heat recovery boiler heat transfer surface was carried out using the results presented in works [6, 7]. The evaluation results are summarized in **Table 1**. The table includes the following parameters: G_g^{gte} – exhaust gas flow rate of the gas turbine engine, kg/s; t_g^{gte} – exhaust gas temperature of the gas turbine engine, °C; D^{WHRB} – steam production rate of the waste heat recovery boiler, kg/s; $D_{react}^{s.g.}$ – synthesis gas production per 1 MW of engine power, (kg/s)/MW; F_{SA} – heat transfer surface area of the waste heat recovery boiler, m²; F_{react} – surface area of the synthesis gas reactor, m². These parameters were used to assess the thermal and dimensional efficiency of various boiler design configurations.

In column 6, the numbers indicate the types of surfaces made from tubes: 1 – round cross-section with spiral-strip fins; 2 – round cross-section with spiral-strip fins **and dimpled systems on the fins**; 3 – elliptical cross-section with flat fins **and dimpled systems on the fins**.

Table 1 – Results of the assessment of technical, economic, and dimensional parameters of mobile energy modules

GTE	G_g^{gte} , kg/s	t_g^{gte} , °C	D^{WHRB} , kg/s	$D_{react}^{s.g.}$, (kg/s)/MW	F_{SA} , m ²		F_{react} , m 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	

The results showed that, based on the range of gas turbine engine capacities from **5,000 to 32,000 kW**, it is possible to create **efficient energy complexes** with a synthesis gas production rate of **up to 0.17 kg/s per 1 MW of power** of the mobile energy module's engine. The **highest specific productivity** was demonstrated by the unit based on the **UGT 5000 engine**, which has an **exhaust gas temperature of 480 °C**.

Thanks to the use of dimple systems on finned surfaces, it is possible to reduce the surface area of a waste heat recovery boiler by up to 32%. In addition, along with the production of synthesis gas, the units will generate electricity, which can be used both for the extraction's own needs and supplied to the national power grid.

This opens up new prospects for modernizing Ukraine's energy infrastructure under conditions of limited access to fossil fuels, thanks to the potential development of offshore gas production.

References:

- [1] Ukraine has the potential to increase gas production to 25–27 billion cubic meters [Electronic resource] / Available at: <https://razumkov.org.ua/statti/ukraina-maie-potentsial-narostyty-vydobutok-gazu-do-2527-mlrd-kubometriv> (accessed: 01.10.2025)
- [2] Farry, M. Ethane from as-sociated gas still the most economical [Electronic resource] / 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: 01.10.2025)
- [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: 01.10.2025)
- [4] Oil & Gas Industry Overview. Crude Oil and Natural Gas: From Source to Final Products . 2019. [Electronic resource] / Available at: https://www.ihrdc.com/els/podemo/module01/mod_001_02.htm. (accessed: 01.10.2025)
- [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 Volume I Classification, Selection, and Thermal Design. Third Edition [Text] / K. Thulukkanam // CRC Press. 2024, 703 p. doi: 10.1201/ 9781003352044
- [7] Kuznetsov, V. V., & Shevtsov, A. P. **Efficiency of marine power plants with heat exchangers based on tube bundles with dimple systems** [Text]. *Aviation and Space Technology*, 2023, №. 4, Special Issue 2(190), pp. 19–27. doi: 10.32620/aktt.2023.4sup2.02

Секція № 3–4. ЕНЕРГООЩАДНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СУДНОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ. ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ВИЩІХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

УДК 62-6631.4

МЕТАНОЛ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ ДВИГУНІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Погорлецький Д. С., к. т. н., доцент¹, Дзигар А. К., старший викладач²

Херсонська державна морська академія

м. Херсон, Україна

¹dimon150582@gmail.com, ²anatoliidzygar@gmail.com

Анотація. Розглянуто можливість використання в якості альтернативного палива для суднових дизельних двигунів внутрішнього згоряння метанолу, як палива з низьким вмістом вуглецю, гнучкістю використання, доступністю на ринку бункерування та рівнем забруднення. Також розглянуто можливість переобладнання існуючих суднових головних дизельних двигунів для використання метанолу в якості палива, для дотримання Індикатора інтенсивності викидів вуглецю (CII IMO), що і викликало інтерес судновласників, згідно з даними MAN Energy Solutions, і MAN, як виробника двигунів, який інформує про швидке зростання кількості запитів на конверсію в двопаливні двигуни для суден контейнерного флоту.

Ключові слова: метанол як перспективне паливо, альтернативні палива, скорочення викидів парникових газів, двопаливні суднові двигуни.

Вступна частина. 13 грудня 2023 року закінчилася 28-ма конференція сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (COP28) з фінальним рішенням, яка містить формулювання про «перехід від викопного палива в енергетичних системах справедливим, упорядкованим і рівноправним чином, прискорення дій в це **критичне** десятиліття, щоб досягти чистого нуля до 2050 року відповідно до наукових досягнень». Визначено фінансування боротьби зі зміною клімату, створений Зелений кліматичний фонд (Green climate fund), який отримав обіцянки для поповнення під час COP28, і загальна сума обіцянок досягла рекордних 12,8 мільярда доларів США від 31 країни світу.

До фінального документу COP28 вперше за майже 30 років увійшов не тільки заклик до переходу від викопного палива, але й COP28 закінчилася новими міжнародними обіцянками по проблемам таким як викиди метану нафтогазовими компаніями, збільшення потужності відновлюваних джерел енергії, потроєння всесвітньої атомної генерації, вирішення питань продовольства і проблем втрати біорізноманіття [1]. Приділено уваги проблемі усунення викидів метану, за два роки після COP26 у Глазго більш ніж 150 країн приєдналися до вирішення проблем з викидами метану, а також анонсовані проєкти ЄС, Китаю та США щодо зменшення викидів метану.

Ціль роботи – аналіз можливості використання різних альтернативних видів палива у суднових енергетичних установках.

Основна частина. Зростаючий вплив парникових газів та зміна клімату планети, а також негативні наслідки збільшення використання викопних видів палива потребують скорочення викидів парникових газів.

Швидка зміна клімату, з причини глобального потепління потребує альтернативних джерел енергії. Відновлювані види палива не можуть бути дешевшими за викопне паливо, але як тільки система торгівлі викидами ЄС (ETS) почне встановлювати ціни на вуглецеві викиди а атмосферу від судноплавства, тоді для судновласників з оглядом на декарбонізацію, з'явиться можливість використовувати судна з набагато меншими викидами вуглецю. Протягом перших трьох-чотирьох років існування системи (EU ETS) власники здійснюватимуть фіксовані платежі, а не торгуватимуть вуглецем, але після цього до вуглецевого ринку, може надійти можливість власникам суден, працюючих нижче граничного рівня викидів, отримувати дохід. У зв'язку термінами мети ІМО, щодо скорочення викидів CO₂ на 40 % до 2030 року, судноплавство не може чекати, поки недоступні паливні технології досягнуть технічної готовності, схвалення і доступності регулюючих органів. Чистий метанол як низьковуглецеве паливо доступний вже зараз для існуючих суден, а також для новобудов (рис. 1).

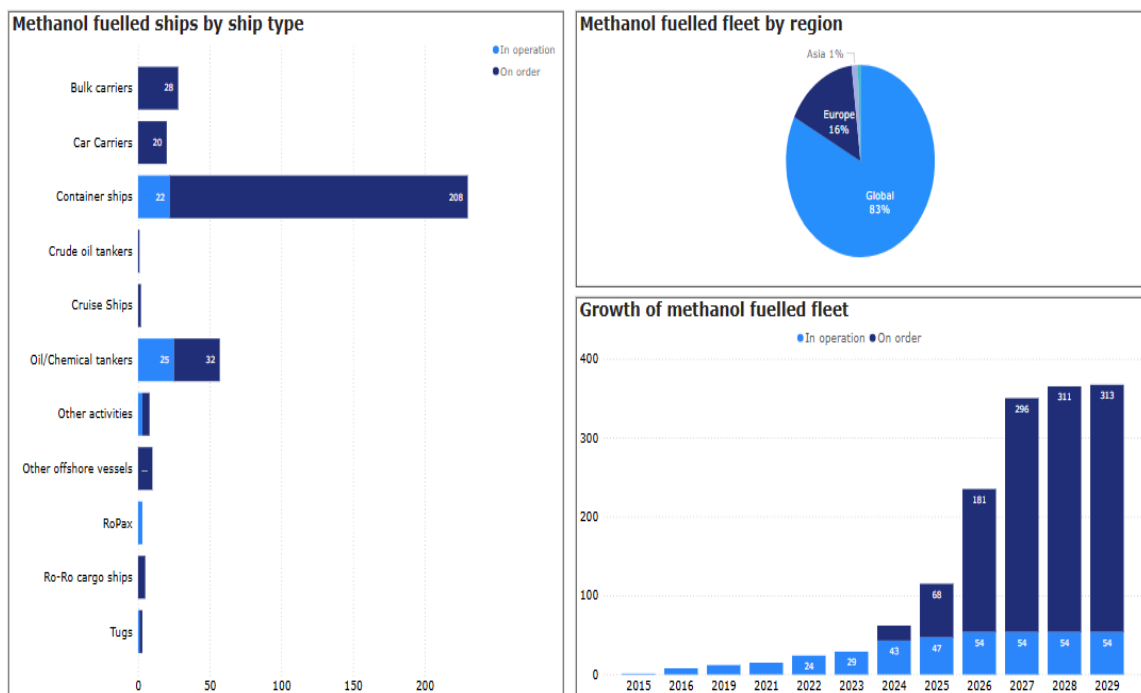


Рисунок 1 – Використання метанолу на різних типах суден

Для прикладу судноплавні компанії, такі як Waterfront Shipping, Stena/Proman, NYK і MOL, побудували серії танкерів для транспортування метанолу, які використовують частину вантажу як паливо для суднових двигунів, існують запити по використанню метанолу в якості палива для суден балкерного флоту. Виробники суднових двигунів інформують про збільшення інтересу до модернізації та переобладнання для використання метанолу для існуючих двигунів.

Метанол має технічні переваги в порівнянні з іншими видами палива. Інтерес до метанолу для нових суден в тому, що багато спеціалістів вважають, що аміак набагато складніше впроваджувати в якості палива з міркувань безпеки, а до забезпечення допустимих мір безпеки та схвалення нормативних органів ІМО може пройти багато часу. Метанол – це рідке паливо, яке можна зберігати і транспортувати без необхідності охолодження або витримки під тиском, безпечніший у бункеруванні, простіший у використанні та більш доступний, ніж аміак. З 2021 року компанія Maersk замовляє лише нові судна, які працюють на екологічно чистому паливі (рис. 2). Maersk визначає «зелене паливо» як паливо з низькими або дуже низькими викидами парникових газів протягом життєвого циклу порівняно з викопним паливом. Під «низьким» ми маємо на увазі паливо зі скороченням викидів парникових газів протягом життєвого циклу на 65...80 % порівняно з викопним паливом. «Дуже низький» відноситься до палива зі скороченням викидів ПГ на 80...95 % протягом життєвого циклу порівняно з викопним паливом.



Рисунок 2 – Копенгаген, Данія – A.P. Moller – Maersk (Maersk) – перший із 18 суден-контейнеровозів, двигуни яких використовують метанол в якості палива

09 лютого 2024 року судно розпочало вантаж перевезки на лінії AE7, що з'єднує Азію та Європу, включаючи заходи в порти в Шанхаї, Танджунг-Пелепасі, Коломбо та Гамбурзі, а Нінбо, Китай, його перший пункт призначення. Контейнеровоз, побудований компанією Hyundai Heavy Industries (HHI) у Південній Кореї, має номінальну місткість 16000 контейнерів (TEU) і оснащений двопаливним двигуном, який дозволяє працювати на метанолі, так і на біодизелі та традиційному паливі. Це другий контейнеровоз у світі, який може використовувати зелений метанол в якості палива, першим був фідерний контейнеровоз Laura Maersk, який увійшов в експлуатацію у вересні 2023 року. Наступні два судна були прийняті в експлуатацію в першій половині 2024 року. Maersk отримав чотири додаткові ідентичні судна у другій половині 2024 року, а також має на замовлення 24 контейнеровози. На всіх замовлених судах встановлені

двопаливні двигуни, що зможуть працювати на зеленому метанолі. 12 із замовлених суден мають місткість 16 000 TEU, 6 із замовлених суден мають місткість 17 000 TEU, 6 із замовлених суден мають місткість 9000 TEU. В енергетичному еквіваленті метанол конкурує з морським газойлем протягом останніх п'яти років. Наявний метанол, отриманий з природного газу, має подібне скорочення викидів вуглецю до СПГ, а також не має викидів SOx, дуже низьких викидів PM і NOx. Блакитний метанол (Blue methanol), вироблений у поєднанні з уловлюванням та зберіганням вуглецю, дає ще нижчі викиди. Виробництво зеленого метанолу, отриманого з біомаси або з уловленого CO₂ та відновлюваних джерел електроенергії, а також зеленого водню, зростає, бо виробники визначають очікуваний попит від судноплавства. Прогнозується, що загальна встановлена потужність блакитного та зеленого метанолу лише в ЄС досягне понад 3 мільйонів тон на рік в найближчий час. Це набагато випереджає «цільові» відсотки скорочення викидів ІМО до 2030 року, якщо вони базуватимуться на комбінації звичайного метанолу з нижчим/нульовим вмістом вуглецю, і навіть невеликі обсяги зеленого метанолу (green methanol), змішаного з сірим (grey methanol), забезпечить значне зменшення викидів парникових газів. Вибір метанолу в якості суднового палива, продемонстроване AP Møller-Maersk при замовленні серії суден з двопаливними двигунами свідчить про те, що великі судновласники серйозно поставилися до проблеми декарбонізації. І цей тренд продовжили судновласники та оператори CMA CGM, MSC, Pacific International Lines, X-Press Feeders і COSC, що висловили зацікавленість чи зробили замовлення. Оголошено про замовлення MPC, зареєстрованого в Осло, два контейнеровози місткістю 1300 TEU з двопаливними двигунами для метанолового палива на китайській верфі Taizhou Sanfu Ship Engineering. Судновласники визнають, що метанол надає їм величезну гнучкість у впровадженні палива з низьким рівнем забруднення та низьким вмістом вуглецю як паливо, що доступне і прозоро продається.

Метанол – це дуже дешеве паливо є в наявності майже у всіх великих портах. ІМО зараховує метанол до четвертого за важливістю морського палива. Метанол відповідає вимогам ІМО NOx Tier III: відпрацьовані гази взагалі не містять сірки, а вуглекислого газу на 15 % менше, ніж звичайний мазут. Двигун також може працювати на низькосірчистих марках палива RMG, DMA і DMB, перемикаючись на метанол і з нього, при цьому обидві системи повністю ізольовані, з окремими паливними танками і окремими системами бункерування. Це причини попиту і підвищеного інтересу до суден, що працюють на метанолі. Clarksons повідомляє (червень 2023 р.), що в експлуатації є 29 суден, які можуть використовувати метанол, і 128 у замовленні. Побудовані судна будуть в період з 2023 по 2028 рік. У березні 2023 року MAN заявила, що веде переговори щодо замовлення до 120 нових двигунів на метанолі з 80 підписаними контрактами, додавши, що цього року замовлення на двотактні двигуни на метанолі перевищують кількість замовлень на подібні двигуни на СПГ. Більшість замовлень використання метанолу в поєднанні з кількома видами палива. Будуються судна з використанням традиційного палива, але з високим рівнем готовності для можливого переходу на метанол як паливо.

Прогнози Clarksons (<https://www.clarksons.com/>) свідчать про значне зростання кількості замовлень, що містять і готові до використання метанолу. І якщо в 2022 році на судна з використанням метанолу припадало 3 % портфеля замовлень, то до 2030 року це може бути близько 20 %, тобто до 1200 суден.

Метанол – це легкий, безбарвний і легкозаймистий спирт з формулою CH_3OH . Він виготовляється з різноманітної сировини, включаючи природний газ, біомасу та вуглекислий газ. У двигуні внутрішнього згоряння метанол вступає в реакцію з киснем повітря і створює вуглекислий газ і воду, а також теплову енергію. Викиди вуглекислого газу, можна досягти нульових викидів вуглецю протягом життєвого циклу, якщо метанол виробляється з використанням біомаси або водню та вуглекислого газу з відновлюваних джерел. Однак двигуни, що працюють на метанолі, потребують невеликого відсотка пілотного палива, що призводить до викидів вуглецю. Метанол як морське паливо розглядається на використання палива для декарбонізації судноплавства. Хоча в даний час виробляється паровим риформінгом природного газу, як найпростіший зі спиртів він може альтернативно виготовлятися з різних видів біомаси чи відходів, або навіть із самої атмосфери, використовуючи потенційно невикопне паливо джерела живлення, що підвищує його екологічність. Однією з головних переваг метанолу як виду палива є те, що він має єдину молекулярну структуру, незалежно від шляху виробництва – на відміну від природного газу, дистиляту нафтового походження чи залишкового палива, які є сумішшю різних типів вуглеводнів, тобто суднові двигуни можуть бути налаштовані точніше для ефективного спалювання. Метанол не містить сірки, що дозволяє уникнути проблеми використання в зонах контролю викидів (ECA). Однак метанол токсичний і з відносно низькою температурою спалаху, 12 °C, вимагає додаткової уваги під час зберігання, транспортування та використання. ISO в процесі розробки специфікації метанолу для суднового палива. Метанол як вантаж для транспортування підпадає під дію Додатку II Конвенції MARPOL, як суднове паливо метанол підпадає під визначення терміну «мазут», наведеного в правилі 2 Додатку VI до Конвенції MARPOL, а також до вимог положення 18 Додатку VI до Конвенції MARPOL. Оскільки температура спалаху метанолу нижча загальної межі використання 60 °C згідно з розділом II-2 Конвенції SOLAS, воно розглядається в рамках подальшого розвитку IMO. Крім того в контексті метанолу, який використовується як «нафтове паливо», відповідно до правила 1 MARPOL Додаток I, постачальник повинен також надати Паспорт безпеки матеріалу (MSDS) – відповідно до глави VI правила 5-1 SOLAS. Ряд товариств класифікації суден мають власні правила для суден, що працюють на метанолі. Як нестандартне суднове паливо з низькою температурою спалаху портові органи, як правило, мають додаткові спеціальні вимоги, пов'язані з постачанням метанолу як палива для суден. Принципи бункерування однакові в основі – безпечне транспортування, без витоку або іншої небезпеки від постачальника на судно. Оператори бункерних барж та суден знайомі з навантаженням, перевезенням і відвантаженням метанолу з і на нафтопереробні заводи. Оператори берегових терміналів, суднові екіпажі знайомі

і добре навчені завантажувати звичайні мазутні марки палив (DM/RM). З метанолом як бункерним продуктом проблема полягає в тому, щоб адаптувати ці існуючі можливості до безпечного бункерування метанолу як палива з низькою температурою спалаху в бункерні танки суден з використанням засобів індивідуального захисту. До них слід віднести, як мінімум: захисний шолом (каска), захист очей (окуляри чи маска), антистатичне захисне взуття, спиртостійкі рукавиці, комбінезон (вогнезахисний з антистатичного матеріалу), іскробезпечний детектор парів метанолу.

Переваги метанолу як суднового палива:

- Викиди оксидів сірки: при спалюванні метанолу не виділяються оксиди сірки та дуже низький рівень твердих частинок.
- Вимоги до зберігання: метанол є рідиною при температурі навколишнього середовища та тиску, тому його не потрібно стискати або зберігати охолодженим.
- Змішується у воді: метанол добре розчиняється, тому в разі розливу паливо швидко розчиниться в морській воді.
- Щільність енергії метанолу в цілому подібна до аміаку і зберігання економічно доцільним, хоча і не таким, як важкий мазут (HFO).

Аміак може безпосередньо використовуватися в якості палива як носій водню завдяки надзвичайно високій щільності водню в ньому та безпечно транспортується та зберігається для використання. Аміак як паливо в дизельних двигунах є складним через його дуже низьку реакційну здатність, більш привабливе паливо для малообертових довгоходових суднових дизельних двигунів.

Висновки. Метанол має чудовий потенціал та відіграє значну роль як стійке паливо для майбутнього як у модернізованих, так і в нових суднових двигунах. Однак потрібні подальші наукові дослідження та дослідно-конструкторські роботи, великомасштабне промислове виробництво зеленого метанолу. Окрім цього потрібно забезпечити безпечне та ефективне використання метанолу на борту судна, безпека перш за все, необхідно створення повної системи від паливного баку до суднового двигуна. Природний газ (СПГ) вже надав судноплавству набагато кращу альтернативу в майбутньому, але паливо, таке як метанол з відновлюваних джерел енергії, буде необхідно для досягнення цілей скорочення викидів парникових газів, ІМО та більших цілей Паризької угоди, щоб стримати підвищення глобальної середньої температури до рівня нижче 2 °C вище до індустріального рівня.

Список літератури

[1] Laursen, R.; Barcarolo, D.; Patel, H.; Dowling, M.; Penfold, M.; Faber, J.; Király, J.; van der Ven, R.; Pang, E., van Grinsven, A. (American Bureau of Shipping, CE Delft, and Arcsilea); Potential of Ammonia as Fuel in Shipping This report and any associated materials are available online at www.emsa.europa.eu; European Maritime Safety Agency 2022.

[2] Майбутні види палива та технології. URL: <https://futurefuels.imo.org/home/latest-information/fuel-uptake/> (дата звернення: 01.09.2025).

[3] Maersk перше велике судно на метанолі на торговельному шляху Азія – Європа. URL:<https://www.maersk.com/news/articles/2023/12/07/maersk-to-deploy-first-large-methanol-enabled-vessel-on-asia-europe-trade-lane> (дата звернення: 01.09.2025).

[4] JFE Holdings, Inc.; Application of Ammonia as a Fuel to Marine Diesel Engine.

[5] Метанол. URL:<https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2024/04/2024-MIs-On-the-Water-and-on-the-Way-.pdf> (дата звернення: 01.09.2025).

[6] Carlos Gervasio Rodríguez, María Isabel Lamas, Juan de Dios Rodríguez and Amr Abbas; Journal of Marine Science and Engineering; Possibilities of Ammonia as Both Fuel and NOx Reductant in Marine Engines: A Numerical Study.

Pohorletskyi Dmytro., Dzygar Anatolii.

Methanol as a fuel for marine engines

The possibility of using methanol as an alternative fuel for marine diesel internal combustion engines is considered, as a fuel with low carbon content, flexibility of use, availability in the bunkering market and level of pollution. The possibility of converting existing marine main diesel engines to use methanol as a fuel, to comply with the Carbon Intensity Indicator (IMO CII), which has aroused interest from shipowners, according to data from MAN Energy Solutions, and MAN, as an engine manufacturer, which reports a rapid increase in the number of requests for conversion to dual-fuel engines for container fleet vessels, is also considered.

Keywords: methanol as a promising fuel, alternative fuels, greenhouse gas emission reduction, dual-fuel marine engines.

УДК 621.4

ВИКОРИСТАННЯ БОКС-КУЛЕРІВ В ЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В. М. Патлайчук, канд. техн. наук, доцент¹, О. А. Козирко, аспірант²

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна

¹ volodymyr.patlaichuk@nuos.edu.ua, ² oleh.kozyrko@nuos.edu.ua

Анотація. Розглянуті особливості використання теплообмінних апаратів типу «бокс-кулер» в централізованих двоконтурних системах охолодження суднових енергетичних установок. Проаналізовані переваги та недоліки їхнього використання.

Ключові слова: суднова енергетика; теплообмінник; бокс-кулер; система охолодження; теплове навантаження.

Традиційним для сучасних суднових енергетичних установок є використання централізованої двоконтурної системи охолодження водою її складових елементів [1, 2]. Одна из можливих схем виконання такої системи для дизельної установки наведена на рис. 1.

В наведеній схемі усі компоненти енергетичної установки охолоджуються лише очищеною прісною водою, яка циркулює по замкнутому контуру. Охолодження же прісної води у свою чергу здійснюється в центральному охолоджувачі 12 забортною водою.

Використання таких систем, порівняно з одноконтурними, дозволяє зменшити довжину трубопроводів забортної води всередині машинного відділення, мінімізувати кількість

елементів, контактуючих із нею, і тим самим суттєво підвищити надійність енергетичної установки. Як переваги даної схеми, відзначають також те, що використання латуні для виготовлення труб забортної води тепер не призводить до надмірних витрат, а в контурі прісної води в більшості випадків замість кожухотрубчастих теплообмінників тепер можна використовувати більш компактні та ефективні пластинчасті. Централізована система охолодження безумовно не позбавлена недоліків, але за рахунок оптимізації навантаження зберігає високі параметри енергоефективності на всіх режимах роботи [1, 3, 5].

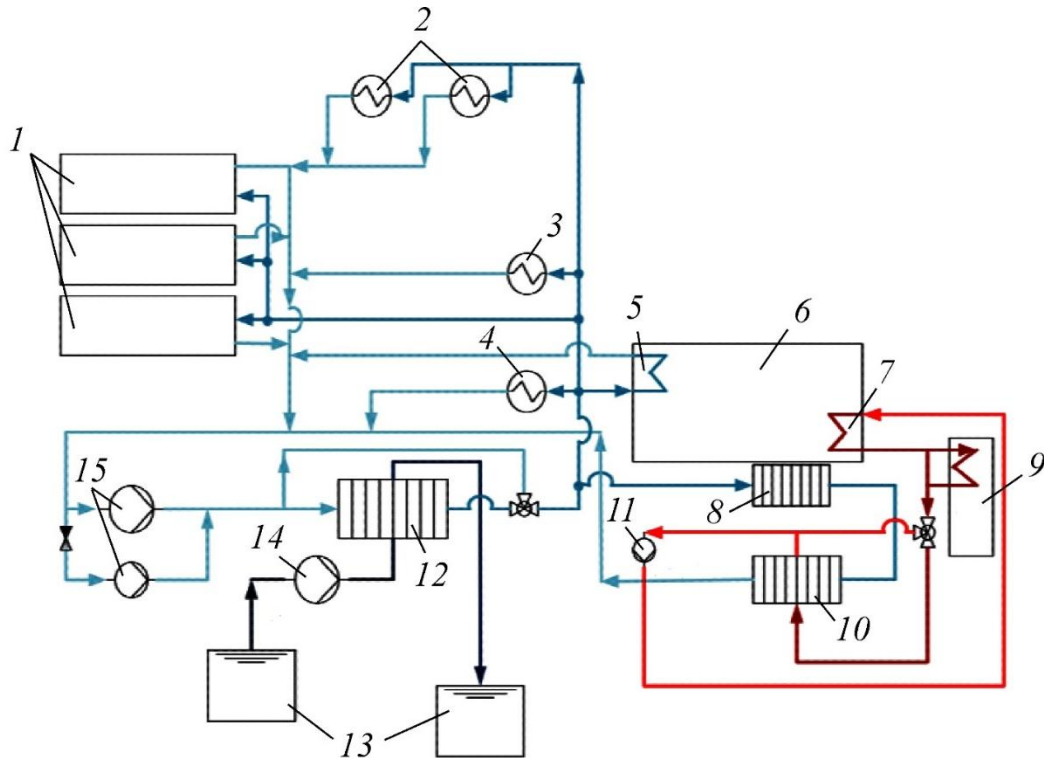


Рисунок 1 – Схема суднової централізованої системи охолодження [3]:

1 – дизель-генератори; 2 – охолоджувачі системи кондиціонування повітря; 3 – охолоджувачі інших суднових елементів; 4 – конденсатор котельної установки; 5 – охолоджувач наддувного повітря головного двигуна; 6 – головний двигун; 7 – охолоджувач кожуха двигуна; 8 – маслоохолоджувач головного двигуна; 9 – генератор прісної води; 10 – охолоджувач води високої температури; 11 – насос охолодження головного двигуна; 12 – центральний охолоджувач забортною водою; 13 – кінгстонні ящики; 14 – насос забортної води; 15 – насоси прісної води

В останні роки намітилася тенденція використання на судах малої і середньої водотоннажності в подібних двоконтурних схемах замість центрального охолоджувача 12 теплообмінних апаратів типу «бокс-кулер» [3, 6].

Бокс-кулер складається з пучка U-подібних труб (рис. 2), вертикально закріплених у кінгстонному ящику судна. Охолодження прісної води, що проходить по цим трубам, здійснюється, головним чином, за рахунок природньої конвекції забортної води в кінгстонному

ящику. Циркуляція та постійне оновлення заборотної води забезпечується спеціальними отворами у вхідній та вихідній решітках. Додаткове підвищення ефективності охолодження може бути досягнуте внаслідок примусової циркуляції заборотної води, викликаной рухом судна.

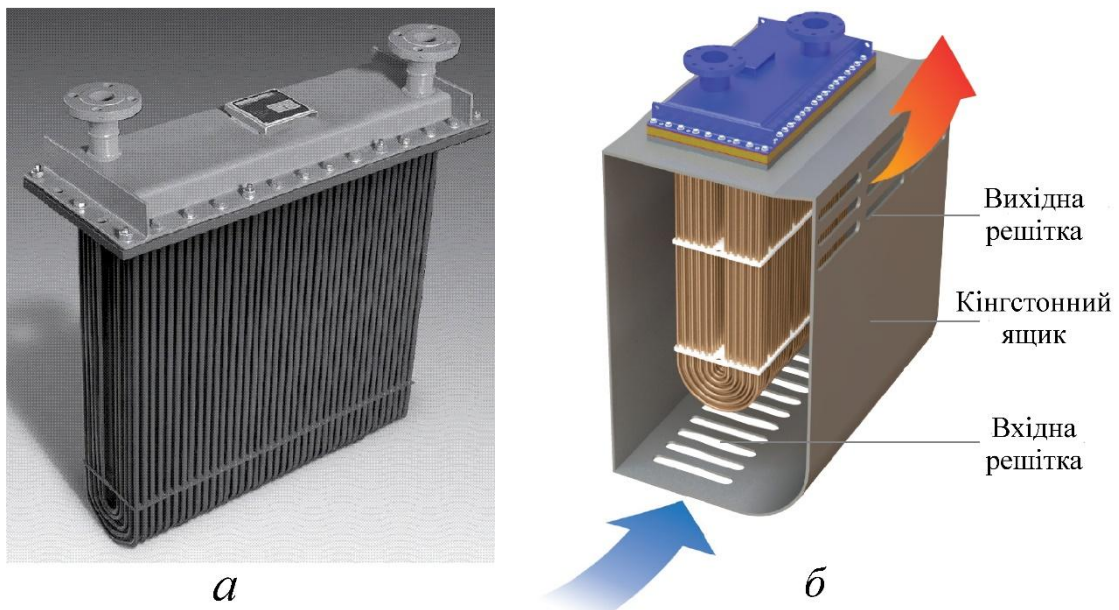


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд бокс-кулера (а) та його розташування в кінгстонному ящику (б)

Практична реалізація таких конструкцій вперше почалася в Нідерландах у кінці XX ст. Зараз їх серійне виробництво ведеться рядом нідерландських («WEKA Marine B.V.», «NRF Thermal Engineering B.V.», «VDL Klima B.V.», «Blokland B.V.»), німецьких («Kelvion Holding GmbH») та американських («Duramax Marine LLC») компаній.

Окремі секції бокс-кулера можуть бути включені як паралельно, так і послідовно. Залежно від конкретної конфігурації кінгстонного ящика пучок труб може розташовуватися в ньому поздовжньо або поперечно. З метою оптимізації розміщення в обмеженому просторі секції бокс-кулера за формою можуть бути виконані прямокутними, круглими або ступінчастими.

Труби теплообмінника, які знаходяться у безперервному контакті з морською водою, виконують з корозійно-стійких мідно-нікелевих сплавів. Щоб запобігти їх біологічному обростанню застосовують різні заходи. З них найчастіше перевага віддається системам захисту з використанням струму ICAF (Impressed Current Anti Fouling). Аноди з чистої міді встановлюються у кінгстонному ящику під теплообмінником (рис. 3). Між анодами та корпусом подається постійний струм, що призводить до розчинення міді в морській воді. Іони міді створюють безперервне токсичне середовище, яке запобігає осіданню відкладень.



Рисунок 3 – Схема та зовнішній вигляд розміщення анодів системи ICAF

Дослідники відзначають, що використання бокс-кулерів в системах охолодження має наступні переваги [3].

1. Суттєво зменшується споживання електроенергії в процесі експлуатації судна, оскільки виключаються витрати на роботу насосів циркуляції забортної води. (Баланс спожитої електричної енергії для різних типів суден свідчить про те, що насоси охолоджувальної води є одними з найвитратніших та найбільш використовуваних елементів енергетичної установки, які функціонують на всіх режимах її роботи. Витрата електроенергії на їх привід для деяких суден сягає 10 % від загальної кількості споживаної електрики.)

2. Одними з найменш надійних елементів суднової енергетичної установки є елементи контура охолодження забортною водою (труби, запорна арматура, насоси, контрольно-вимірювальні прилади та ін.). Відсутність цих елементів, внаслідок використання бокс-кулерів, суттєво підвищить надійність енергетичної установки. Також суттєво зменшуються деякі загрози, пов'язані із втратою ходу судна та затопленням машинного відділення.

3. Знижуються витрати на побудову судна через відмову від купівлі насосів забортної води та арматури; зменшуються витрати на монтаж обладнання та насиченість машинного відділення механічним обладнанням; зменшується кількість донно-бортової арматури.

Висновки: На даний момент використання бокс-кулерів зосереджене, головним чином, у складі дизельних установок суден малої водотоннажності. Питання їх використання у складі систем охолодження суднових газотурбінних установок та у складі суден середньої та великої водотоннажності залишаються актуальними і потребують дослідження.

Література

- [1] Dere, C., & Deniz, C. (2019). Load optimization of central cooling system pumps of a container ship for the slow steaming conditions to enhance the energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 206-217.
- [2] Olsen, A. A. (2023). Central cooling system. In: *Introduction to Ship Engine Room Systems*; Routledge: London, UK, 2023; pp. 211-217.

[3] Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2018). Enhanced ship energy efficiency by using marine box coolers. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 83-88.

[4] Jeon, T., & Lee, Y. (2025). Energy saving in ship central cooling systems: IMC-tuned PID with feedforward control. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13(3), 510.

[5] Kocak, G. & Durmusoglu, Y. (2017). Energy efficiency analysis of a ship's central cooling system using variable speed pump. *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 17(1), pp. 43-51.

[6] Młynarczyk, A. (2013). Box coolers as an alternative to existing cooling systems. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 36, no. 108, pp. 131-136.

Using of box coolers in central cooling systems of marine power plants

Patlaichuk V. M., Kozyrko O. A.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine.

Abstract. *The paper considers the features of using heat exchangers of the "box-cooler" type in central dual-circuit cooling systems of ship power plants. The advantages and disadvantages of their use are analyzed.*

Key words: *marine power generation; heat exchanger; box cooler; cooling system; thermal load.*

UDC 621.4

ESTIMATION OF THE THERMAL LOAD ON THE SHIP'S COOLING SYSTEM FROM GAS TURBINE ENGINES AND THEIR SYSTEMS

V. M. Patlaichuk, PhD., Associate Professor ¹, **O. A. Kozyrko**, postgraduate student ²

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Mykolayiv, Ukraine

¹ volodymyr.patlaichuk@nuos.edu.ua, ² oleh.kozyrko@nuos.edu.ua

Abstract. *The thermal load on the central cooling system of the ship from the propulsive gas turbine engines of a simple thermodynamic cycle and their servicing systems was assessed. The possibility of using heat exchangers of the "box cooler" type for cooling these engines was analyzed.*

Key words: *marine power generation; gas turbine unit; heat exchanger; box cooler; cooling system; thermal load.*

In recent years, heat exchangers of the "box cooler" type have gained some popularity in the power plants of small and medium-sized vessels. However, at the moment their use is concentrated exclusively in diesel power plants, where they are used mainly in cooling systems of main engines, as well as for cooling charge air and oil of lubrication systems of main engines and gearboxes. Issues related to the use of box coolers in cooling systems of marine gas turbine power plants remain unresolved at the moment.

Without setting ourselves the goal of making a complete analysis of the energy flows of the central cooling system of a vessel that uses gas turbine units as a propulsion system, we will assess the possible thermal load on the box-cooler heat exchangers from the gas turbine engines themselves and their servicing systems.

The heat load on a central cooling system can potentially come from:

- a) oil of lubrication systems of the gas turbine engine and its gearbox;
- b) air of gas turbine units with intercooling of working fluid between the compressors.

The lubrication system of a gas turbine engine maintains the normal temperature of its bearings and gears of mechanisms mounted on it through cooling.

According to [1], due to friction in the specified elements, approximately 0.5–1.0 % of the mechanical energy of rotation of a gas turbine engine is converted into thermal energy. Accordingly, the mechanical efficiency of turbomachines η_m is approximately 0.990–0.995 for this case.

To reduce the output shaft speed, marine gas turbine units traditionally include a gearbox in addition to the engine. The gearbox lubrication system maintains the normal temperature of its gears and pinions, and also reduces their wear and friction losses.

In marine gas turbine units, as a rule, multi-stage gearboxes are used, which often have both bypass and planetary stages in their composition. According to [1], the loss of mechanical energy of rotation in gearboxes due to friction is approximately 2–4 %. Higher values are characteristic of gas turbine units of lower power. Accordingly, the mechanical efficiency of the gearbox η_g is approximately 0.96–0.98.

The heat flow that must be removed to the sea water using a box-cooler heat exchanger from the engine Q_m and gearbox Q_g lubrication systems can be estimated to a first approximation through the indicated mechanical energy losses.

Let us estimate the value of the heat removed from the oil of the lubrication systems for specific designs of gas turbine engines, which are currently mass-produced for the naval fleet [2, 3]. The results of the calculations are summarized in table 1.

It is advisable to compare the obtained figures with the heat load Q_{cool} on a box cooler from ship main diesel engines of similar power.

As a sample for comparison, we choose low-speed diesel engines, the characteristic features of which are specific fuel consumption $g_e^{DE} = 0.160\text{--}0.170$ kg/(kWh), use of fuel with a lower heat value 42700 kJ/kg and a total share of the heat balance of 22–25 %, which is taken away by the cooling system (losses with cooling of the engine casing, charge air and lubrication system oil) [4]. The results of the comparison are shown in Fig. 1.

Table 1. Calculation results of heat removed from lubrication systems

Engine	Output shaft power N_e^{GT} , kW	Pressure ratio	Air flow, kg/s	Heat from lubrication systems $Q_m + Q_g$, kW
Engines of GE Aerospace (USA)				
LM500	4570	14.4	16.4	146–292
LM2500	25060	19.3	69.4	782–1566
LM2500+	30200	22.2	85.7	960–1924
LM6000PC	46123	28.5	130	1503–3012
Engines of Rolls-Royce Holdings plc (Great Britain)				
MT7	3900	10.1	15.6	122–244
MT30	36000	24.0	113	1181–2366
Engines of "Zorya"-"Mashproekt" (Ukraine)				
UGT3000	3360	13.5	16.6	115–230
UGT6000	6700	16.6	31.0	232–464
UGT15000	17600	19.6	73.0	604–1211
UGT25000	28700	23.6	93.0	947–1897

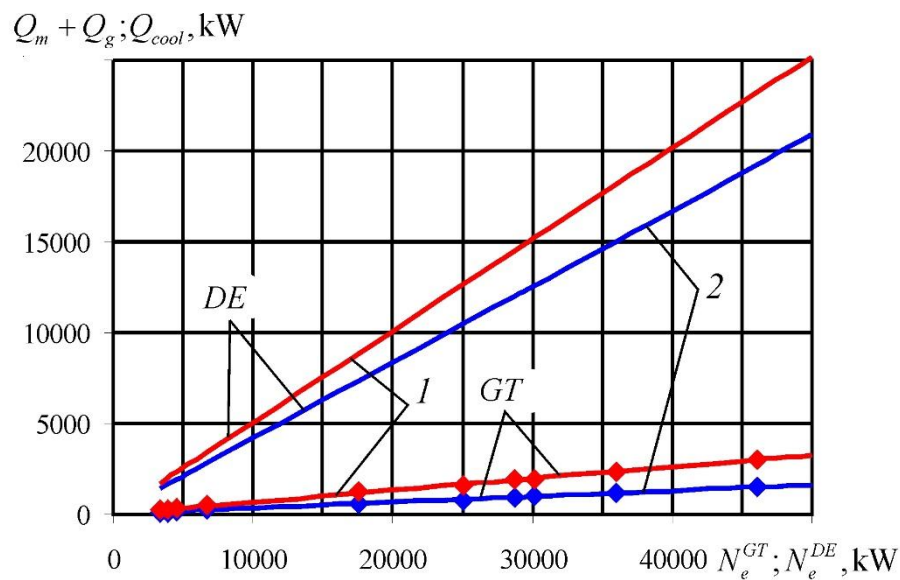


Fig. 1. Dependence of heat removed by sea water on engine power:

DE – low-speed diesel engine; *GT* – simple cycle gas turbine unit; *1* – maximum parameter value; *2* – minimum parameter value

The results of the comparative analysis indicate that the thermal load on the box cooler when used to remove heat from simple cycle gas turbine units will be approximately 7.5–12.5 times lower than when used to cool low-speed diesel engines of similar power.

According to [5; 6], box-cooler heat exchangers, which are currently mass-produced for ship needs, can be used to cool diesel engines with a capacity of up to 30 MW. The maximum value of this parameter is explained by the dimensional limitations of the sea chests in which the box coolers are placed.

Conclusion: The results of the comparative analysis indicate that mass-produced box coolers with standard sea chests sizes can potentially be used to remove heat from simple cycle gas turbine units with a capacity of up to 225–375 MW, which more than covers the possible range of use of these units in marine power engineering.

References

- [1] Romanovskyi, H. F., Vashchylenko, M. V., & Serbin, S. I. (2003). *Teoretychni osnovy proiektuvannia sudnovykh hazoturbinnnykh ahrehativ* [Theoretical foundations of the design of marine gas turbine units]. Mykolaiv: UDMTU, 304 p. [in Ukrainian].
- [2] Patlaichuk, V., & Vaschilenko, M. (2020). *Design of gas turbine units*. Миколаїв: НУК, 88 с.
- [3] Liu, K., Chen, D., Serbin, S., & Patlaichuk, V. (2023). *Gas Turbines Structural Properties, Operation Principles and Design Features*. Shanghai: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 256 p.
- [4] Horbov, V. M. (2010). *Entsyklopediia sudnovoї enerhetyky* [Encyclopedia of Marine Energy]. Mykolaiv: NUOS, 622 p. [in Ukrainian].
- [5] Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2018). Enhanced ship energy efficiency by using marine box coolers. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 83-88.
- [6] Młynarczak, A. (2013). Box coolers as an alternative to existing cooling systems. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 36, no. 108, pp. 131-136.

Оцінка теплового навантаження на систему охолодження судна від газотурбінних двигунів і обслуговуючих їх систем

Патлайчук В. М., Козирко О. А.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна.

Анотація. Виконана оцінка теплового навантаження на централізовану систему охолодження судна від пропульсивних газотурбінних двигунів простого термодинамічного циклу і обслуговуючих їх систем. Проаналізована можливість використання для охолодження даних двигунів теплообмінних апаратів типу «бокс-кулер».

Ключові слова: суднова енергетика; газотурбінний агрегат; теплообмінник; бокс-кулер; система охолодження; теплове навантаження.

УДК 621.438

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОПАЛЮВАННЯ
ВИПУСКНИХ ГАЗІВ ДЛЯ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ SOFC-GT****С. І. Сербін**, *д-р техн. наук, професор*¹, **О. В. Патлайчук**, *аспірант*²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**м. Миколаїв, Україна*¹ serhiy.serbin@nuos.edu.ua, ² alexpatlaichuk@gmail.com

Анотація. Виконано порівняльний аналіз ефективності допалювання випускних газів від твердооксидних паливних елементів суднової гібридної системи SOFC-GT в допалювачах дифузійного типу та в допалювачах з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

Ключові слова: твердооксидний паливний елемент; газова турбіна; суднова енергетика; гібридна система; допалювач випускних газів.

Актуальними для комплексного забезпечення електроенергією суден та об'єктів морської інфраструктури є розробка та створення гібридних енергетичних систем, що поєднують у собі твердооксидні паливні елементи (SOFC) та газові турбіни (GT). Такі енергетичні системи дозволяють поліпшити не тільки показники енергетичної ефективності та надійності устаткування, але й значно покращити екологічну обстановку в районах їх експлуатації.

Допалювання випускних газів паливних елементів, що мають високу температуру, але дуже низьку теплотворну здатність і забаластовані водяною парою, в таких гібридних системах необхідно здійснювати в спеціальних допалювачах (камерах згоряння), які можуть використовувати різні технології спалювання горючих компонентів [1, 2].

Для визначення найбільш ефективної технології допалювання випускних газів обрано тривимірний метод CFD-аналізу робочих процесів.

Розроблено математичну модель допалювача випускних газів на основі розв'язування системи рівнянь, яка описує конвективний і дифузійний перенос концентрацій для кожного з компонентів реагуючої суміші в турбулентній системі. Детальний опис математичної моделі наведено в роботах [3; 4].

При проведенні розрахунків використано схему горіння хімічних реагентів, яка містить 58 хімічних реакцій з 18 хімічними компонентами: CH₄, H₂, CO, O₂, H₂O, CO₂, H, O, OH, NO₂, CH₃, HCO, CH₂, CH, CH₂O, H₂O₂, N, N₂ [5].

В якості об'єктів дослідження обрано дві конструктивні схеми допалювача випускних газів (рис. 1):

а) традиційна схема дифузійного типу, заснована на використанні принципів турбулентного горіння вуглеводнів в газотурбінних камерах згоряння;

б) схема з попереднім утворенням паливо-окисної суміші в каналах фронтового пристрою допалювача, яка була запропонована і розглянута авторами в роботах [6, 7].

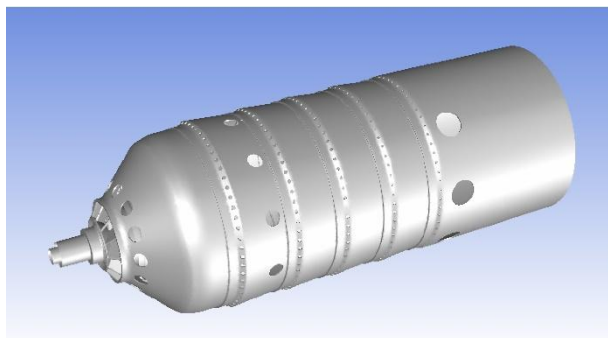
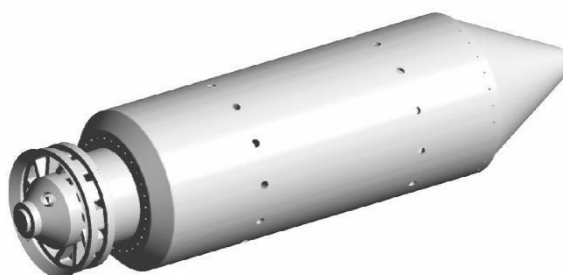
*a**б*

Рисунок 1 – Конструктивні схеми допалювача випускних газів:

a – традиційного (дифузійного) типу; *б* – запропонована авторами

В першому випадку випускні анодні гази паливного елемента спрямовуються до форсунки камери допалювання і витікають через ряд отворів в зону горіння, куди подається також первинний окислювач (катодні газы) через лопатковий завихрювач і радіальні отвори в жаровій трубі.

В другому випадку анодні газы через спеціальні трубопроводи спрямовуються в район фронтового пристрою допалювача, куди направляється частина первинного окислювача (катодні газы) для попереднього утворення паливо-окисної суміші. Далі ця паливо-окисна суміш переміщується з другою частиною первинного окислювача на виході з осьового завихрювача та спрямовується в жарову трубу для остаточного допалювання.

Розрахунки вигорання випускних газів в допалювачах різних типів проведені для горючої суміші наступного складу (масові частки): $H_2 = 1,177\%$, $H_2O = 38,876\%$, $CO = 7,064\%$, $CO_2 = 52,883\%$.

Склад окислювача (масові частки): $O_2 = 16,53\%$, $H_2O = 3,84\%$, $CO_2 = 0,52\%$, $N_2 = 79,11\%$. Витрата окислювача після катодної секції паливного елемента дорівнювала $2,8254\text{ кг/с}$, його температура – 1193 К ; витрата випускних газів після анодної секції SOFC приймалася рівною $0,4077\text{ кг/с}$, їх температура – 1193 К .

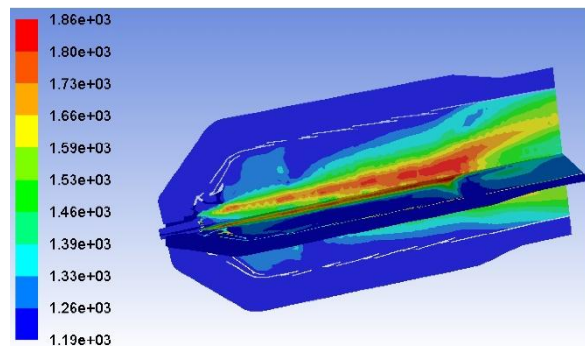
В результаті тривимірних розрахунків з використанням програмного комплексу Ansys Fluent отримано дані про робочий процес двох різних допалювачів випускних газів твердооксидних паливних елементів.

На рис. 2 наведено розподіл температур та масових часток горючих компонентів (CO та H_2) по довжині паливоспалюючих пристроїв. Видно, що в допалювачі дифузійного типу при витіканні випускних газів з форсунки з високою швидкістю, яка визначається діаметрами і кількістю отворів в ній, горючі елементи концентруються на осі камери і міра їх вигорання залишається низькою. Таким чином традиційна газотурбінна камера згоряння дифузійного типу не може бути використана в якості допалювача випускних газів твердооксидних паливних елементів без відповідної модифікації її фронтального пристрою, завихрювача та форсунки.

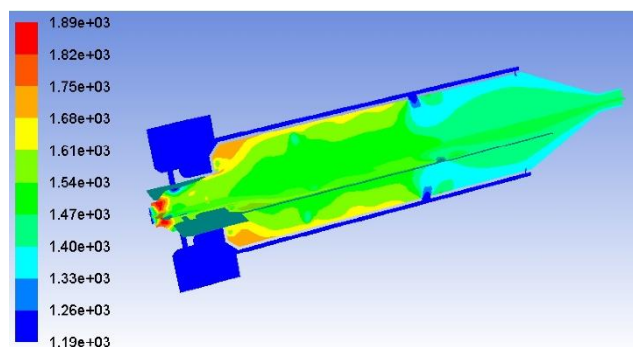
В допалювачі з попереднім утворенням паливо-окисної суміші горючі компоненти інтенсивно вигоряють практично після завихрювача. Концентрації оксиду вуглецю і молекулярного водню на виході мають практично нульові значення, що свідчить про високу ефективність процесів вигорання анодних газів.

Висновки:

1. Для розрахунків робочого процесу в допалювачах різних типів гібридної системи SOFC–GT використано математичну модель, засновану на розв'язуванні рівнянь, що описують конвективний і дифузійний перенос концентрацій компонентів в турбулентній реагуючій системі.



a



б

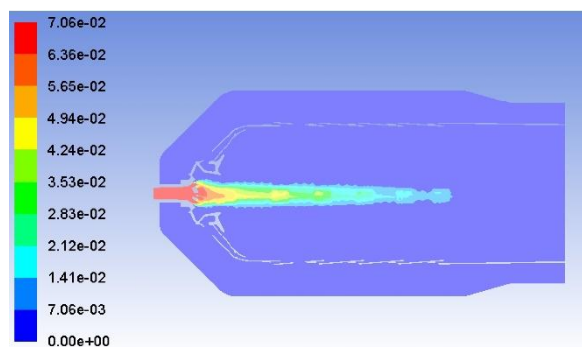
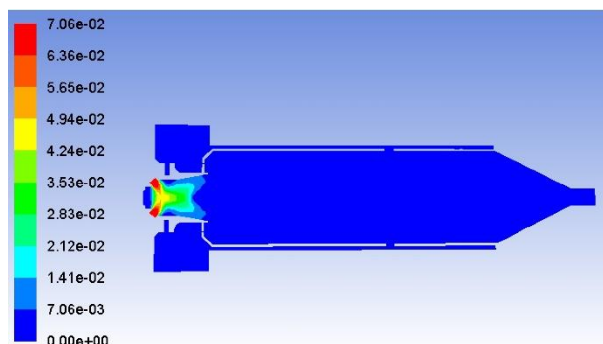
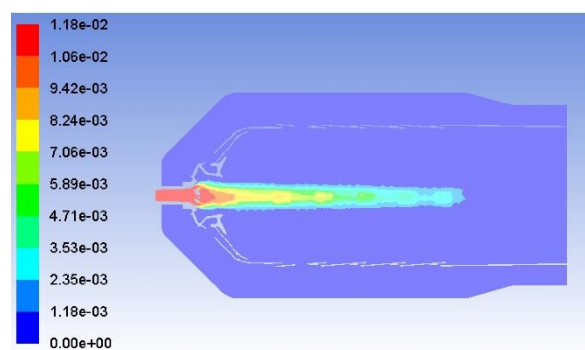
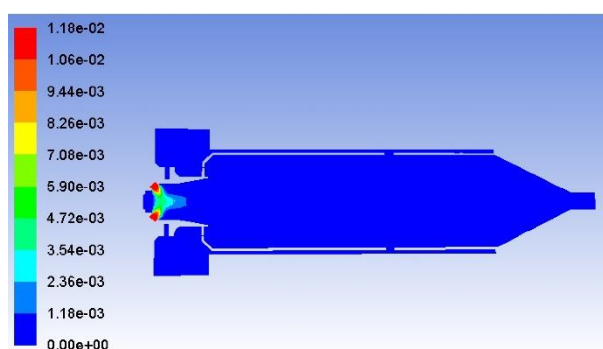
*б**2**д**е*

Рисунок 2 – Розподіл температур, К (*а, б*), масових часток CO (*в, г*) та H₂ (*д, е*) по довжині допалювачів, відповідно, дифузійного та запропонованого типів

2. Проведено тривимірні розрахунки аеродинаміки потоків і вигорання випускних газів від SOFC в допалювачах дифузійного типу та з попереднім утворенням паливо-окисної суміші.

3. Встановлено, що запропонована авторами схема допалювача з попереднім утворенням паливо-окисної суміші забезпечує повне догорання горючих компонентів випускних газів твердооксидних паливних елементів.

Література

[1] Pianko-Oprych, P., & Jaworski, Z. (2017). Numerical investigation of a novel burner to combust anode exhaust gases of SOFC stacks. *Polish Journal of Chemical Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 20-26.

[2] Yanyi, Y., Weijuan, Y., Jingyi, C., Xiaoyu, Z., & Junhu, Z. (2024). Numerical investigation on the exhaust gas combustion of an SOFC in a catalytic multichannel burner. *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 1322956.

[3] Serbin, S., Cherednichenko, O., Lychko, B., Patlaichuk, V., & Ratushniak, I. (2023). Characteristics of the Afterburner for the SOFC-GT Marine Hybrid Power System. *Transport Means: Proceedings of the International Conference*, Palanga, Lithuania, vol. 1, pp. 374-379.

[4] Matveev, I.B., Serbin, S.I., Vilkul, V.V., & Goncharova, N.A. (2015). Synthesis Gas Afterburner Based on an Injector Type Plasma-Assisted Combustion System. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 12, pp. 3974-3978.

[5] Bilger, R.W., Starner, S.H., & Kee, R.J. (1990). On Reduced Mechanisms for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames. *Combustion and Flame*, vol. 80, pp. 135-149.

[6] Сербін, С. І., & Патлайчук, О. В. (2024). Дослідження ефективності допалювача відхідних газів твердооксидного паливного елемента. *Збірник наукових праць НУК*. № 1, с. 62-68.

[7] Сербін, С. І., Ващиленко, М. В., & Патлайчук, О. В. (2024). Розробка конструкції допалювача відхідних газів для суднової системи SOFC-GT. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: Матеріали XV Міжн. наук.-техн. конференції. Миколаїв: НУК, с. 165-167.

Comparative analysis of the efficiency of afterburning for the SOFC-GT marine system

Serbin S., Patlaichuk O.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the efficiency of exhaust gas afterburning from solid oxide fuel cells of the SOFC-GT marine hybrid system in diffusion-type afterburners and with preliminary formation of a fuel-oxide mixture.

Key words: solid oxide fuel cell; gas turbine; marine power engineering; hybrid system; afterburner.

УДК 621.431

EXPLORING EVERLLENCE FOR NEXT-GENERATION INTERNAL COMBUSTION ENGINE DESIGN

Nalyvaiko V., PhD, Professor¹

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Avdiunin R.²

Lecturer at the Department of Marine Engineering and Power Engineering

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

¹vasyl.nalyvaiko@nuos.edu.ua; ²roman.avdiunin@nuos.edu.ua

Abstract. This paper provides a general description of the Everllence CEON operational-analytical platform. Emphasis is placed on using predictive digital learning models to design new marine internal combustion engines. The connection between digital twins and machine learning demonstrates how it significantly reduces research time when studying engine performance on alternative fuels.

Keywords: Everllence CEON, RUL, ML.

The platform was initially introduced by MAN Energy Solutions under the name MAN CEON, becoming the digital core for connecting marine equipment to the AWS cloud and collecting telemetry data from hundreds of sensors in real time. Machine learning tools and big data analytics were integrated into the platform to support decarbonization of operations, optimize fuel consumption, and improve fleet reliability through customizable dashboards and visualization of key performance indicators. Following the rebranding of MAN Energy Solutions into Everllence SE, the platform was renamed Everllence CEON, highlighting its expanded capabilities and digitalization strategy for marine operations. Today, Everllence CEON forms the foundation of Everllence's digital products: PrimeServ Assist, Asset+, and Data+, providing global monitoring, predictive analytics, and data-driven consulting for shipowners and fleet operators.

In Everllence CEON, “predictive digital learning models” generally refer to embedded machine learning algorithms that accumulate operational and failure patterns, continuously “learn” from streaming sensor data, and on this basis help operators make maintenance decisions and optimize scheduled work. This has enabled a 20–30 % reduction in unplanned downtime through timely servicing and component replacement, and a 10–15 % reduction in unexpected failures thanks to accurate remaining functional life prediction (RUL).

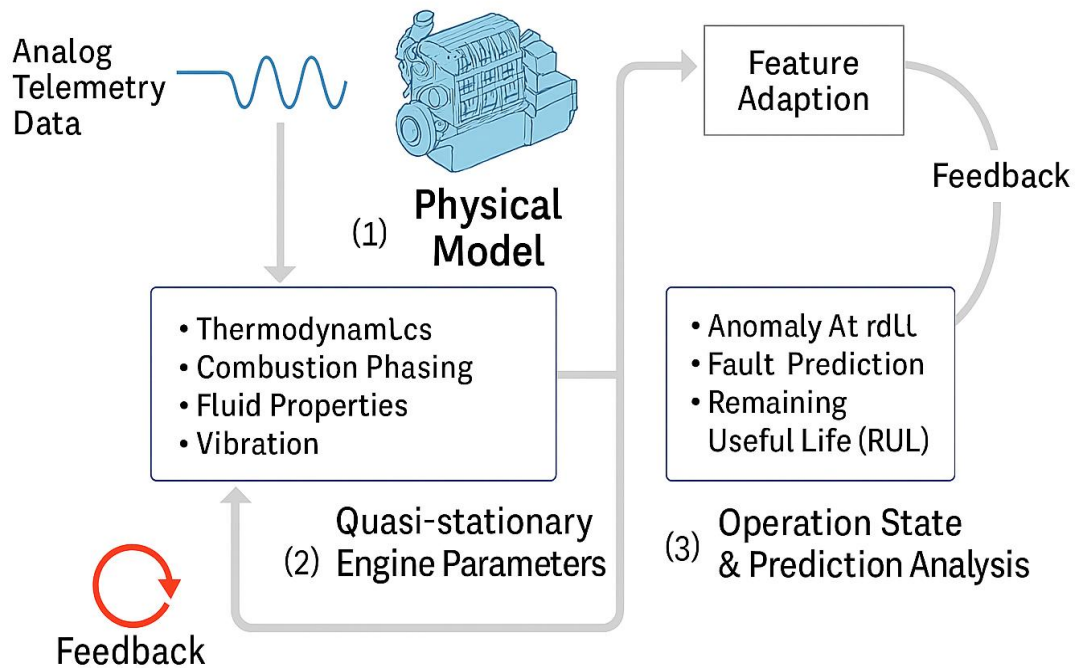


Fig. 1 – Concept of ML digital twin

The software platform was initially conceived as an operational-analytical tool for marine power plants. Still, its architecture (digital twins + ML/AI + cloud analytics) makes it a powerful instrument for developing and designing new internal combustion engines (ICEs).

The ML digital twin in Everllence combines physical models and machine learning, turning a marine power plant into a “living” system capable of learning from its own data and assisting engineers in real-time decision-making (Fig. 1).

Advantages for developers:

- Reduced time for design and testing.
- Lower prototyping costs.
- More accurate prediction of service life and reliability.
- Faster adaptation to new fuels and environmental requirements.

Thus, Everllence CEON becomes a bridge between operations and the development of new ICEs: fleet data serves as input for digital twins and ML models. At the same time, research results return to operations as optimized engine parameters.

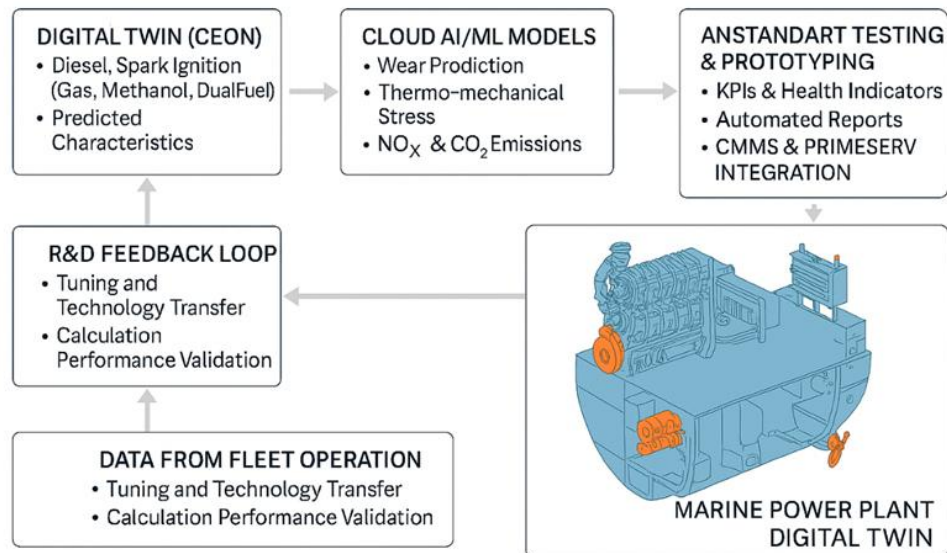


Fig. 2. Structural and logical diagram of the development of an internal combustion engine using Everllence CEON

Fig. 2 illustrates how the engine's digital twin, cloud-based ML models, and fleet data are combined into a single loop: design, testing, feedback, and design improvement.

- Digital Twin (CEON): models new ICE types (diesel, gas, dual-fuel).
- Cloud AI/ML Models: predict wear, thermomechanical stresses, and emissions.
- Testing & Prototyping: verify compliance with ISO/IMO and operation on future fuels (LNG, NH₃, methanol).
- Fleet Operation Data: provides real load profiles, failures, and energy efficiency indicators (EEXI).
- R&D Feedback Loop: closes the cycle, enabling engineers to adjust designs and validate calculations.

In this way, Everllence transforms ICE development into a continuous learning process: each new engine is designed and improved based on the operational experience of the entire fleet.

Everllence is actively used in researching two-stroke ammonia engines (e.g., Everllence B&W ME LGIA), and it is expected to become a key element in achieving zero-carbon shipping. Initial single-cylinder tests were conducted in 2023, full-scale testing began in 2024, and the first engine deliveries to shipyards are scheduled for 2025.

Advantages of using CEON in Ammonia Engine Innovation:

- Reduced time from concept to serial engine production.
- Lower physical testing costs through virtual simulations.
- Increased safety when working with toxic fuels.
- Flexible adaptation to future fuels (NH₃, methanol, hydrogen).

Everllence CEON has transformed ammonia engine development into a digitally managed process, where combustion physics, digital twins, and machine learning work together. This enables faster and safer market introduction of the next generation of zero-carbon marine engines.

Conclusions:

Everllence CEON is a monitoring system and a digital ecosystem that integrates fleet operations, machine learning, and digital twins. Its advantages are particularly significant for designing and developing new marine ICEs.

- Engine digital twin: virtual ICE models allow thousands of operational scenarios (different fuels, loads, climates) without physical testing costs.
- ML/AI analytics: predictive models forecast wear, thermal stresses, and emissions (NO_x, CO₂, N₂O). Automatic adaptation of models to specific engine types and operating conditions.
- Reduced prototyping: unlike the classical approach requiring many physical prototypes, CEON needs only a few pilot units since most tests are conducted in the digital twin.
- Regulatory compliance: CEON helps verify design decisions against IMO Tier III, EEXI, CII, and ISO standards, accelerating certification and market entry.
- Development cycle: traditional ICE development takes over five years; with CEON, it takes about three years or less, thanks to digital simulations and fleet feedback.
- Cost reduction: testing and prototyping costs reduced by 30–40 %.

References:

1. Everllence. (2025, September 15). *Everllence CEON*. <https://www.everllence.com/>
2. Everllence. (2025, September 15). *Advancing ammonia engine innovation*. <https://www.everllence.com/marine/products/two-stroke-engines/ammonia-engine>

УДК 621.81

THE APPLICATION OF PULSED MAGNETIC FIELDS IN CRANKSHAFT REPAIR TECHNOLOGY

Avdiunin R.¹

*Lecturer at the Department of Marine Engineering and Power Engineering
Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of
Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

Zahrai Y.²

*Student of Higher Education at the Department of Marine Engineering and Power
Engineering, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of
Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine*

¹roman.avdiunin@nuos.edu.ua; ²zagrajevgenij549@gmail.com

Abstract. The paper discusses the technology of straightening marine and stationary internal combustion engine crankshafts using a hydraulic press and shims of various geometric shapes. A classification of shim types, a comparative analysis of traditional and advanced materials, and a step-by-step straightening algorithm are presented, considering international standards (ISO, GOST, ABS). Special emphasis is placed on using pulsed magnetic fields (PMF) within the framework of magnetic-particle testing technology.

Keywords: crankshaft, straightening, shims, hydraulic press, MPI, GOST, ISO, ABS, marine engine repair.

In the event of crankshaft bending – whether caused by operational overloads, accidental impacts, or progressive fatigue damage – the alignment of the leading journals and the overall geometry of the shaft are adversely affected [1]. A recognized repair approach involves the straightening of the crankshaft through the application of shims [2]. This technique enables the correction of deformation and the restoration of geometric accuracy without necessitating complete shaft replacement, offering economic and operational advantages by reducing repair costs and minimizing downtime.

This repair technique involves the installation of specialized shims: metallic or composite elements are positioned between the main bearings and the engine block bed to compensate for crankshaft bending. To ensure precise adjustment, the shims are carefully selected according to their thickness and geometric profile, thereby restoring journal alignment and reducing shaft run-out.

The crankshaft is first dismantled and thoroughly cleaned of oil residues and carbon deposits. The run-out of the journals is then measured, typically with the shaft supported on prisms and assessed using a dial indicator. Based on these measurements, the magnitude and direction of the bend are

determined. Subsequently, the crankshaft is positioned on prisms or on special supports of the press. Steel shims of various thicknesses are placed beneath the bent section, enabling the localization of the applied force and preventing damage to the journals [2, 3].

The straightening procedure is carried out with a hydraulic press, applying force in the region of maximum deflection. The shims regulate both the point of force application and the degree of deflection. The process is performed gradually, with intermediate checks of journal run-out. In some cases, localized heating of the bent area (up to 150–200 °C) is employed to reduce internal stresses. After each pressing cycle, the crankshaft is removed and re-examined for run-out.

The permissible tolerances are generally as follows [3]:

- for leading journals – not exceeding 0.02–0.03 mm;
- for crankpin journals – up to 0.04 mm (depending on the applicable standard, e.g., ISO, GOST, ABS).

If necessary, the straightening operation is repeated until the required tolerances are achieved.

The primary function of shims (Fig. 1) is to redistribute the load transmitted by the press punch, thereby preventing damage to the journals while compensating for bending through localized elevation of the shaft. In addition, shims enable precise regulation of both the magnitude of the applied force and the exact point of its application. Following the straightening procedure, magnetic-particle inspection (MPI) is recommended to detect the presence of microcracks that may have formed during the process.

Figure 1 – Geometric Shims (elements) Applied during the Straightening of Crankshafts

Element	Geometric Shape	Functional Purpose	Material (Typical)	Normative sizes /standards	Range of standard sizes
Supporting prism	V-obraced (90° or 120°) 	Shaft positionin while measuring and straightening	Tool steel (C45, 41X ²)	Angle of 90° or 120	50– 150 mm
Flat shim	Rectangular plate 	Localization of force; bend compensation	Hardened steel copper, bronze	Constructional steels	0.1–5.0 mm, L, W ≥10 mm
Press punch 	Curved plate 	Uniform distribution of force on crank-shaft journal	Hardened steel. copper, bronze	According to the journal	Rounding to the diameter of journal
Calibration washer	Annular disc 	Adjusting clearance and force transmission	Steel	0.1–1.0 mm	0.1-1.0 mm

MPI constitutes one of the critical stages in crankshaft repair, particularly following straightening with shims. Its primary purpose is to detect microcracks and defects that may have

developed during service operation or due to the corrective forces applied in the straightening process [4].

The inspection focuses on the leading and crankpin journals and the fillet radii, which are recognized as areas of maximum stress concentration [5]. During crankshaft bending and subsequent straightening, localized stresses arise in these regions. Even when the geometric alignment of the shaft is successfully restored, fatigue-induced microcracks may still form within the metal structure.

The crankshaft is magnetized either by a longitudinal or a transverse magnetic field. Magnetic powder, applied in dry form or as a suspension, is distributed across the surface. In the presence of defects, the magnetic flux lines are distorted, causing the particles to accumulate and form an indicator pattern.

Figure 2 illustrates the general view of an external honeycomb cylindrical solenoid, designated for impulse magnetic field treatment (OIMP-101), within which a diesel engine crankshaft is positioned [6]. The cylindrical solenoid incorporates an internal honeycomb structure that ensures uniform magnetic flux distribution. A circumferentially wound coil, connected to a pulse generator, produces the magnetic field. The magnetic flux lines (depicted as red arrows) close through the core and traverse the crankshaft.

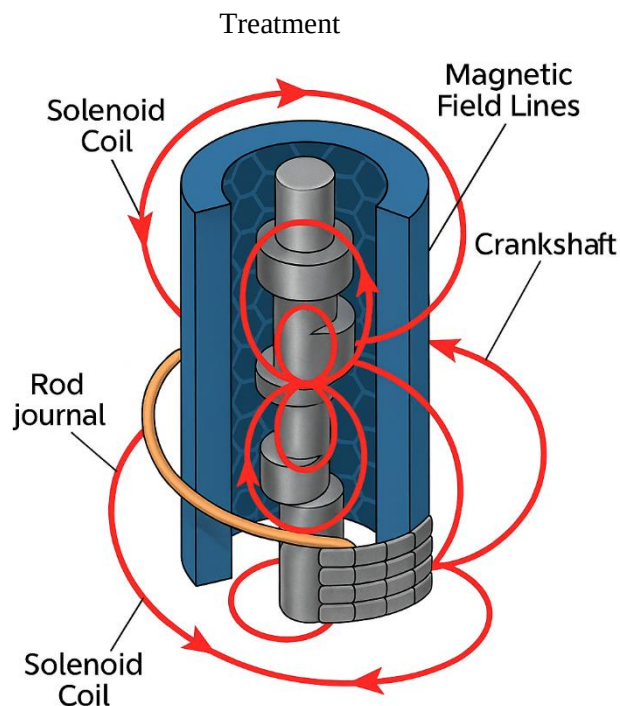


Figure 2 – External Hexagonal (honeycomb) Cylindrical Solenoid for Impulse Magnetic

A high-intensity impulse magnetic field is generated within the journals and fillet radii region. This field contributes to the reduction of residual stresses, the refinement of the metal structure, and the enhancement of fatigue strength. The method is applied either as an alternative to conventional heat treatment or combined during the repair and restoration of crankshafts.

Conclusions:

The method belongs to the category of “cold” techniques for restoring geometry. It offers several practical advantages compared to complete replacement or more complex procedures such as overlay welding and mechanical re-machining. It allows repairing large and unique shafts (for example, those used in marine diesel engines and compressors). The method applies only in elastic deformation cases, excluding cracks and fatigue fractures.

This type of repair demonstrates high compatibility with other techniques: it can be combined with magnetic-particle inspection (for detecting microcracks). It may also be integrated with impulse magnetic treatment to relieve residual stresses.

Applying magnetic-particle inspection using the OIMP-101 setup enables the examination of leading and crankpin journals and fillet radii — zones of maximum stress concentration [6, 7]. This is particularly important after straightening, where localized stresses may have induced hidden defects, with the honeycomb design of the external solenoid enhancing the effectiveness of the inspection.

The method allows for detecting microcracks with an opening as small as 0.001 mm and a depth of 0.01 mm. Magnetic-particle inspection is included among the mandatory nondestructive testing methods specified by ISO, ASTM, GOST, and ABS standards for marine and power engineering crankshafts [8].

References:

- [1]. QuantiServ. Crankshaft Straightening [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.quantiserv.com/solutions/crankshaft-straightening/> (дата звернення: 24.09.2025).
- [2]. Ghassemi, A., & Safari, M. Analysis of crankshaft failure and repair techniques // Engineering Failure Analysis. – 2019. – Vol. 104. – P. 659–670. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.012.
- [3]. Li, Y., Zhang, H., & Wang, J. Straightening technology of large marine crankshafts: cold and hot methods comparison // Journal of Marine Science and Technology. – 2020. – Vol. 25, No. 3. – P. 455–463. – DOI: 10.1007/s00773-019-00672-1.
- [4]. ASTM E1444/E1444M-16. Standard Practice for Magnetic Particle Testing. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. – 18 p. – DOI: 10.1520/E1444_E1444M-16.
- [5]. ISO 9934-1:2016. Non-destructive testing – Magnetic particle testing – Part 1: General principles. – Geneva: International Organization for Standardization, 2016. – 22 p.
- [6]. Patent na vynakhid № 122503, Ukraina, MPK G01M 13/04 (2019.01); C21D 1/04 (2006.01). Stend dlia vyprobuвання upornykh pidshypnykiv / Uvarov V.A., Makhan'ko O.V., Andrijejev A.A., Avdiunin R.Yu. – Zaiavl. 25.02.2018; Opubl. 25.11.2020. – Biul. № 22.
- [7]. Andrijejev A.A., Uvarov V.A., Makhan'ko O.V. Stend dlia vyprobuвання upornykh pidshypnykiv. In: Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: XII Mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia: materialy. – Mykolaiv: NUK, 2021. – P. 189–190.
<https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2021/11/Materiali-konferencii-ISO-2021.pdf>
- [8]. Shlyakhin, D., & Petrov, V. Application of magnetic-particle inspection in crankshaft repair technology // Procedia Structural Integrity. – 2021. – Vol. 31. – P. 112–118. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.07.015.

УДК 621.436

ВПЛИВ ВОДНЮ ЯК ДОБАВКИ ДО НВО НА УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ У ДИЗЕЛЬНОМУ ЗГОРЯННІ

Дрозд О. В.

к. т. н., доцент, в. о. директора

*Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Соломенцев О. І.,

д. т. н., професор,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Кухаренко О. О.,

студент,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація. У роботі досліджується вплив водню як добавки до гідрогенізованої рослинної олії (НВО) на утворення оксидів азоту (NO_x) у процесі дизельного згоряння. Показано, що введення водню прискорює займання та підвищує повноту згоряння, що сприяє зниженню викидів CO та CH . Водночас збільшення швидкості тепловиділення призводить до підвищення пікових температур у циліндрі, що активізує термічний механізм утворення NO_x . Для зниження негативного ефекту запропоновано застосування комбінованих технічних рішень, зокрема оптимізації фаз упорскування, рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) та систем селективного каталітичного відновлення (SCR). Отримані результати підтверджують, що суміш НВО– H_2 є перспективним напрямом декарбонізації морського транспорту, однак потребує комплексної оптимізації для забезпечення відповідності екологічним стандартам ІМО.

Ключові слова: НВО– H_2 , дизельне згоряння, оксиди азоту, рециркуляція відпрацьованих газів, селективне каталітичне відновлення.

Вступ і актуальність. Міжнародна морська організація (ІМО) визначила чіткі екологічні орієнтири для глобального судноплавства, зокрема скорочення викидів CO_2 щонайменше на 40 % до 2030 року та досягнення вуглецевої нейтральності у другій половині століття. Поряд із цим, судна зобов'язані дотримуватися жорстких нормативів щодо оксидів азоту (NO_x), які утворюються під час згоряння в умовах високих температур у дизельних двигунах. Проблема NO_x є особливо актуальною для морського транспорту, оскільки ці сполуки не лише шкодять атмосфері, але й негативно впливають на здоров'я людини, беручи участь у формуванні фотохімічного смогу та кислотних дощів.

Серед можливих рішень найбільш реалістичним для середньострокової перспективи є використання альтернативних палив, які можна застосовувати у вже існуючих дизельних

установках. До таких належать гідрогенізована рослинна олія (HVO), яка завдяки своєму біогенному походженню має низький «чистий» вуглецевий слід, та водень, що під час згоряння не утворює вуглецевих сполук. Поєднання HVO та H_2 у паливній суміші створює перспективу суттєвого зниження викидів CO_2 , CO та CH. Однак вплив водню на механізми утворення NO_x потребує ретельного вивчення, адже високі швидкості горіння й підвищення пікових температур можуть призвести до небажаного зростання цих викидів.

Таким чином, дослідження процесів утворення NO_x у дизельному згорянні на суміші HVO– H_2 має подвійне значення: воно дозволяє оцінити екологічні переваги й водночас визначити потенційні ризики, що важливо для розробки практичних рекомендацій з використання такого палива у морському транспорті.

Теоретичні передумови. Гідрогенізована рослинна олія (HVO) є біогенним паливом, яке відноситься до категорії «drop-in» – тобто може безпосередньо замінювати традиційний дизель без значних модифікацій двигуна. Основними характеристиками HVO є високий цетановий індекс (70–90), відсутність сірки та ароматичних вуглеводнів, хімічна стабільність і низька окиснюваність. Це зумовлює чистіше згоряння та менші викиди твердих частинок і SO_x . Водночас, хоча HVO є більш екологічним у порівнянні з дизельним паливом, його використання не усуває проблему утворення NO_x , адже механізм формування оксидів азоту пов'язаний насамперед із температурними умовами горіння.

Водень, як добавка до HVO, має суттєво інші характеристики. Завдяки високій швидкості поширення полум'я та низькій енергії займання, він прискорює процес займання і робить горіння більш повним. Це сприяє зниженню CO і CH, але водночас підвищує температуру в зоні згоряння, що безпосередньо активізує термічний механізм утворення NO_x (реакції Зельдовича). Крім того, водень впливає на структуру полум'я, підвищуючи його інтенсивність і сприяючи нерівномірному розподілу температурних полів, що також може посилювати локальне утворення NO_x .

Таким чином, теоретичні передумови свідчать про амбівалентний вплив водню у суміші з HVO: з одного боку, він знижує вуглецеві викиди, з іншого – створює ризик посилення утворення NO_x . Цей баланс між позитивними й негативними ефектами визначає необхідність оптимізації режимів роботи двигуна та систем керування.

Методика аналізу. Аналіз впливу водню як добавки до HVO на утворення NO_x у дизельному згорянні може здійснюватися як експериментально, так і за допомогою числового моделювання. У рамках теоретико-аналітичного підходу ключовим інструментом виступає перший закон термодинаміки, що дозволяє визначати баланс енергії в циліндрі. Для цього розглядаються індикаторні діаграми, які описують зміну тиску і температури протягом циклу, а також функції тепловиділення, що дозволяють оцінити швидкість згоряння та його інтенсивність.

Особливу увагу приділяють максимальним значенням тиску та температури, середній швидкості наростання тиску, тривалості основних фаз згоряння та індикаторному коефіцієнту корисної дії. Саме ці параметри визначають умови утворення оксидів азоту. Діапазон частки водню зазвичай розглядають у межах 5–15 % за енергією, що дозволяє поєднати ефект поліпшення горіння зі збереженням керованості процесу.

Крім термодинамічних моделей, широкого застосування набули CFD-методи (Computational Fluid Dynamics), які дозволяють простежити локальні температурні поля, утворення зон високих концентрацій кисню та зони з найбільш інтенсивним формуванням NO_x . Додатково використовуються емпіричні та напівемпіричні залежності, відомі з літератури, для кількісної оцінки концентрацій NO_x .

Такий підхід дає можливість навіть без масштабних експериментів сформувати уявлення про вплив водню на баланс процесів горіння та спрогнозувати зміну рівня NO_x у відпрацьованих газах двигуна, що працює на HVO– H_2 .

Результати та обговорення. Результати аналізу свідчать, що введення водню до складу HVO значно змінює параметри згоряння. По-перше, спостерігається скорочення періоду затримки займання, що забезпечує більш раннє та інтенсивне тепловиділення. По-друге, швидкість згоряння зростає, що призводить до більш рівномірного використання енергії палива. Це дозволяє зменшити викиди CO і CH у вихлопі. Разом із тим підвищення швидкості тепловиділення збільшує пікову температуру в циліндрі на 50–150 K залежно від частки H_2 , що сприяє зростанню інтенсивності утворення NO_x .

Літературні дані свідчать, що при додаванні до 10 % водню підвищення рівня NO_x може становити 5–15 %, тоді як при більших концентраціях (15 % і більше) зростання може бути ще суттєвішим. Водночас позитивний ефект у вигляді скорочення CO та CH перевищує 30%, що свідчить про загальне поліпшення екологічної характеристики двигуна. Отже, екологічний баланс має комплексний характер: одночасне зменшення вуглецевих викидів і підвищення ризику посиленого утворення NO_x .

Це означає, що без супутніх заходів використання водню як добавки може знизити вуглецевий слід, але не забезпечить повної екологічної відповідності через високий рівень NO_x . Тому важливо поєднувати HVO– H_2 із технологіями оптимізації процесу згоряння та післяобробки відпрацьованих газів.

Шляхи зниження NO_x . Для мінімізації утворення NO_x при роботі двигуна на HVO– H_2 пропонується комплекс технічних заходів. Найпростішим підходом є оптимізація кута упорскування палива: зміщення моменту упорскування на більш пізні значення дозволяє знизити пікову температуру і, відповідно, інтенсивність термічного механізму утворення NO_x . Проте це може зменшити ефективність, тому важливо знаходити баланс.

Іншим методом є рециркуляція відпрацьованих газів (EGR). Введення частини вихлопу в циліндр зменшує концентрацію кисню і знижує температуру горіння, що дозволяє зменшити

утворення NO_x на 30–50 %. Водночас занадто високий рівень EGR може погіршувати стабільність згоряння.

Третім важливим напрямом є застосування систем селективного каталітичного відновлення (SCR). Вони дозволяють знизити вміст NO_x у вихлопних газах на 80–90 % шляхом відновлення азоту за допомогою реагентів (наприклад, сечовини). Поєднання SCR з HVO– H_2 робить можливим досягнення жорстких норм IMO Tier III.

У перспективі особливу роль можуть відіграти інтелектуальні системи керування, здатні в режимі реального часу балансувати між ефективністю і екологічністю. Такі системи можуть динамічно регулювати кут упорскування, рівень EGR і параметри упорскування водню, зменшуючи NO_x без втрати ККД.

Висновки. Суміш HVO– H_2 є одним із найперспективніших напрямів у зниженні вуглецевих викидів суднового транспорту. Використання біогенного HVO дозволяє мінімізувати «чистий» CO_2 , а введення водню покращує швидкість і повноту згоряння, що знижує емісію CO та CH. Проте підвищення пікової температури у камері згоряння супроводжується зростанням утворення NO_x , що створює додаткові труднощі для екологічної відповідності.

Для мінімізації негативних ефектів необхідно застосовувати комбіновані технічні рішення: оптимізацію фаз упорскування, використання EGR та SCR, а також інтеграцію з інтелектуальними системами керування. Цифрові двійники та алгоритми машинного навчання можуть стати основою для пошуку оптимального компромісу між ефективністю та екологічними показниками.

Таким чином, вплив водню як добавки до HVO на утворення NO_x має подвійний характер: з одного боку – позитивні ефекти декарбонізації та зменшення токсичних викидів CO і CH, з іншого – ризик підвищення NO_x . Остаточна ефективність використання HVO– H_2 у суднових дизелях залежатиме від інтеграції палива з системами активного керування і післяобробки вихлопу. Подальші дослідження повинні зосереджуватися на числовому моделюванні, експериментальних випробуваннях та довготривалій оцінці впливу на надійність двигунів.

Список літератури

- [1] McCaffery, C. (2022). Effects of hydrogenated vegetable oil (HVO) and biodiesel blends on NO_x emissions in heavy-duty diesel engines. *Environmental Science & Technology*, 56(17), 12000–12010. ([ScienceDirect](#))
- [2] Di Blasio, G. (2022). Hydrotreated vegetable oil as enabler for high-efficient and ultra-low emission vehicles: Achieving EU 6c NO_x emissions targets. *Fuel*, (in press). ([ScienceDirect](#))
- [3] Aatola, H., Larmi, M., Sarjovaara, T., & Mikkonen, S. (2008). Hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable diesel fuel: Trade-off between NO_x , particulate emission, and fuel consumption in a heavy-duty engine. *SAE Technical Paper Series*. ([ResearchGate](#))
- [4] Dimitriadis, A. (2018). Emission characteristics of HVO in a Euro 5 diesel engine: Trade-off between soot and NO_x via injection timing and EGR. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 4, Article 7. ([Frontiers](#))
- [5] Wright, M. L. (2022). Decarbonisation of heavy-duty diesel engines using hydrogen: effects on NO_x formation. *Environmental Advances*, (in press). ([RSC Publishing](#))

- [6] Energy.gov. (2024, accessed). Does the use of hydrogen produce air pollutants such as nitrogen oxides? *U.S. Department of Energy*. ([The Department of Energy's Energy.gov](https://www.energy.gov))
- [7] Ayad, S. M. M. E. (2024). Study on the effects of micro-addition of hydrogen in diesel engines: Improved efficiency and NO_x dynamics. *Journal of the Energy Institute*, (in press). ([ScienceDirect](#))
- [8] Rayapureddy, S. M., Matijošius, J., Rimkus, A., Caban, J., & Słowik, T. (2022). Comparative study of combustion, performance and emission characteristics of hydrotreated vegetable oil–biobutanol fuel blends and diesel fuel in a CI engine. *Sustainability*, 14(12), 7324. ([MDPI](#))
- [9] Bugarski, A. D., et al. (2016). Effects of hydrotreated vegetable oil renewable diesel on aerosol and gaseous emissions compared to ultralow sulfur diesel. *Environmental Science & Technology*, 50(12), 6500–6510. ([PMC](#))
- [10] Gatts, T., Liew, C., & Liu, S. (2012). Emissions of unburned gases in heavy-duty diesel engines with hydrogen dual-fuel combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*. ([ResearchGate](#))

INFLUENCE OF HYDROGEN AS AN ADDITIVE TO HVO ON NITROGEN OXIDE FORMATION IN DIESEL COMBUSTION

Drozd O.V.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Acting Director

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Solomentsev O.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Kukhareenko O.O.

Student

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Abstract. *The paper investigates the influence of hydrogen as an additive to hydrotreated vegetable oil (HVO) on nitrogen oxide (NO_x) formation in diesel combustion. It is shown that hydrogen addition accelerates ignition and enhances combustion completeness, thereby reducing CO and HC emissions. At the same time, the increased heat release rate leads to higher peak in-cylinder temperatures, which intensify the thermal mechanism of NO_x formation. To mitigate this negative effect, combined technical solutions are proposed, including optimization of injection timing, exhaust gas recirculation (EGR), and selective catalytic reduction (SCR) systems. The findings confirm that HVO–H₂ blends represent a promising direction for the decarbonization of maritime transport, though comprehensive optimization is required to ensure compliance with IMO environmental standards.*

Keywords: *HVO–H₂, diesel combustion, nitrogen oxides, exhaust gas recirculation, selective catalytic reduction.*

УДК 621.436

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДВИГУНА НА HVO–H₂

Колесников О. В.,

*морський суперінтендант та портовий капітан. FANTASEA Ship Management, Морська
компанія., Миколаїв, Україна*

Соломенцев О. І.,

д. т. н., професор,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Шалапко Г. Г.,

студентка,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація. У роботі розглядаються можливості застосування інтелектуальних систем керування для стабілізації режимів роботи суднового дизельного двигуна, що працює на альтернативному паливі – суміші гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та водню. Використання адаптивних алгоритмів, машинного навчання та цифрових двійників дозволяє враховувати змінний склад паливної суміші й оперативно коригувати параметри процесу згоряння. Такий підхід забезпечує баланс між паливною економічністю, зниженням викидів шкідливих речовин та підвищенням довговічності двигуна. Очікуваним результатом є зменшення ризику нестабільності роботи, скорочення викидів CO, CH та NO_x, а також підвищення індикаторного ККД. Отримані результати підтверджують перспективність інтеграції інтелектуального керування як інструменту екологізації та підвищення ефективності морського транспорту.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, HVO–H₂, інтелектуальне керування, машинне навчання, цифровий двійник.

Актуальність проблеми. Перехід морського транспорту на альтернативні палива є однією з ключових вимог сучасності, зумовленою екологічними нормативами ІМО та потребою зниження залежності від викопних ресурсів. Використання суміші HVO–H₂ у суднових дизельних двигунах поєднує екологічні переваги біогенного палива з безвуглецевим характером водню, однак водночас призводить до значних змін у динаміці процесу згоряння. Відмінності у швидкості займання, теплотворній здатності та тепловиділенні створюють ризики нестабільності роботи двигуна, особливо за змінних навантажень та при різних співвідношеннях HVO і H₂.

Традиційні системи регулювання, орієнтовані на стабільні властивості викопного дизелю, не завжди здатні забезпечити оптимальне керування в умовах варіативного складу паливної суміші. У таких ситуаціях виникають проблеми із зростанням пікових тисків, нерівномірністю тепловиділення, збільшенням NOx та механічними навантаженнями. Це зумовлює потребу у застосуванні інтелектуальних систем керування, здатних адаптивно реагувати на зміну складу палива і режимів роботи двигуна. Використання алгоритмів машинного навчання, предиктивних моделей та цифрових двійників створює можливість досягти балансу між енергоефективністю, надійністю та відповідністю екологічним стандартам.

Концепція інтелектуального керування. Інтелектуальне керування у контексті роботи суднового дизеля на HVO–H₂ передбачає застосування комплексних підходів, що поєднують класичні системи регулювання з алгоритмами штучного інтелекту. Йдеться, насамперед, про *адаптивні регулятори*, здатні в режимі реального часу змінювати параметри упорскування залежно від складу палива, навантаження та стану двигуна. Важливу роль відіграють *нейронні мережі* та інші методи машинного навчання, які дозволяють прогнозувати розвиток процесу згоряння на основі історичних і поточних даних сенсорів. Такі моделі здатні враховувати нелінійність і стохастичність процесів, де класичні алгоритми мають обмежену ефективність. Додатково застосовуються *оптимізаційні алгоритми* (наприклад, генетичні чи ройові), що шукають оптимальний компроміс між ефективністю, екологічними показниками та довговічністю двигуна. У практичній реалізації інтелектуальне керування може бути інтегроване з цифровим двійником двигуна, який виконує роль предиктивного модуля і дозволяє перевіряти сценарії у віртуальному середовищі перед їх реалізацією. Таким чином, концепція інтелектуального керування полягає у поєднанні методів штучного інтелекту, адаптивних моделей і фізико-хімічного моделювання для забезпечення стабільності й оптимальності роботи двигуна на HVO–H₂.

Очікувані результати. Запровадження інтелектуального керування у суднових дизелях, що працюють на HVO–H₂, очікувано забезпечить суттєве покращення експлуатаційних характеристик. Насамперед, алгоритми адаптивної оптимізації дадуть змогу підтримувати стабільність тиску і температури в циліндрі, що мінімізує ризик перевантажень та підвищує ресурс основних деталей двигуна.

Застосування методів прогнозування на основі нейронних мереж дозволить завчасно реагувати на зміни паливного складу чи навантаження, підлаштовуючи тривалість та початок упорскування, тиск у форсунках та співвідношення повітря–паливо. Це сприятиме зменшенню витрат палива та підвищенню індикаторного ККД. Одним із ключових результатів стане зниження викидів шкідливих речовин: очікується скорочення викидів CO та CH завдяки більш повному згорянню, а також часткове обмеження NOx за рахунок оптимізації фаз згоряння та інтеграції з системами рециркуляції (EGR) чи каталітичного відновлення (SCR). Додатково інтелектуальне керування створить умови для роботи двигуна у розширеному діапазоні частот

водню, дозволяючи експлуатувати установку як у консервативних, так і в інноваційних паливних стратегіях. У результаті це підвищить екологічну привабливість судноплавства та пришвидшить впровадження низьковуглецевих технологій.

Висновки. Використання інтелектуального керування для стабілізації режимів роботи суднового дизеля на суміші HVO–H₂ є одним із найбільш перспективних напрямів декарбонізації морського транспорту. На відміну від класичних систем, які мають статичні налаштування, інтелектуальні алгоритми здатні навчатися, адаптуватися й забезпечувати оптимальні параметри у широкому діапазоні умов експлуатації. Це дозволяє ефективно реагувати на зміни складу палива, варіації навантаження та зовнішні фактори, підтримуючи стабільність процесу згоряння. Впровадження таких систем створює основу для поєднання екологічних вимог ІМО з економічними інтересами судновласників, адже забезпечується одночасне зниження викидів і підвищення паливної ефективності. У перспективі інтелектуальне керування може бути інтегроване з цифровими двійниками суднових енергетичних установок, що дозволить створити системи прогнозного керування у режимі реального часу. Це відкриває шлях до напівавтономних або навіть автономних суднових двигунів, які самостійно коригуватимуть свої параметри для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик. Таким чином, інтелектуальні системи керування не лише сприяють ефективному переходу на альтернативні палива, але й стають фундаментом для інноваційного розвитку морської енергетики у XXI столітті.

Література

1. Dahake, M. (2024). Intelligent Decision-Based Hydrogen-Biodiesel Engine to Adjust Combustion via Neural Framework. *Fuel*, (in press). ([Kubota Global Site](#), [ScienceDirect](#))
2. Bedei, J., McBain, M., Koch, C. R., Andert, J., & Gordon, D. (2025). Hybrid Reinforcement Learning and Model Predictive Control for Adaptive Control of Hydrogen-Diesel Dual-Fuel Combustion. *arXiv*. ([arXiv](#))
3. Sharma, V., Winkler, A., Norouzi, A., Andert, J., Gordon, D., & Guo, H. (2025). Safe Reinforcement Learning-based Control for Hydrogen Diesel Dual-Fuel Engines. *arXiv*. ([arXiv](#))
4. Norouzi, A., Shahpouri, S., Gordon, D., Winkler, A., Nuss, E., Abel, D., Shahbakhti, M., & Koch, C. R. (2022). Deep Learning based Model Predictive Control for Compression Ignition Engines. *arXiv*. ([arXiv](#))
5. Stoumpos, S., et al. (2020). Towards Marine Dual Fuel Engines Digital Twins. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 200. ([MDPI](#))
6. Liu, L. (2025). Adaptive Digital Twin Framework for Marine Engine Performance Degradation and Control Shift. *Reliability Engineering & System Safety*, (in press). ([ScienceDirect](#))
7. Truong, T. H. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*, 30(4), 81–91. ([ScienceDirect](#))
8. Jeon, J., & Theotokatos, G. (2024). Trustworthiness Framework for Physical Model-Based Digital Twins for Marine Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 595. ([mtu-solutions.com](#), [rolls-royce.com](#))
9. Volvo Penta & CMB.Tech. (2024, October 17). Hydrogen Dual-Fuel Engines for Marine Applications—Reducing Emissions. *Powertrain International*. ([Powertrain International](#))

APPLICATION OF INTELLIGENT CONTROL FOR STABILIZATION OF ENGINE OPERATING MODES ON HVO–H₂**Kolesnykov O.V.**Marine Superintendent and Port Captain,
FANTASEA Ship Management, Shipping Company, Mykolaiv, Ukraine**Solomentsev O.I.**Doctor of Technical Sciences, Professor,
Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine**Shalapko H.H.**Student,
Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Abstract. The paper considers the possibilities of applying intelligent control systems for stabilizing the operating modes of a marine diesel engine running on alternative fuel — a blend of hydrogenated vegetable oil (HVO) and hydrogen. The use of adaptive algorithms, machine learning, and digital twins makes it possible to account for the variable composition of the fuel mixture and promptly adjust combustion process parameters. This approach ensures a balance between fuel efficiency, reduction of harmful emissions, and extended engine durability. The expected results include a reduction of instability risks, lower CO, HC, and NO_x emissions, and an increase in indicated efficiency. The findings confirm the potential of integrating intelligent control as a tool for greening and improving the efficiency of maritime transport.

Keywords: marine diesel engine, HVO–H₂, intelligent control, machine learning, digital twin.

УДК 621.436

ПОБУДОВА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ПРОЦЕСУ ЗГОРЯННЯ У СУДНОВОМУ ДВИГУНІ НА АЛЬТЕРНАТИВНОМУ ПАЛИВІ**Шалапко Д. О.,***к. т. н., доцент;***Вагін Ф. І.,***викладач;***Савченко В. С.,***студент,**Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація. У роботі розглянуто концепцію створення цифрового двійника процесу згоряння у судновому дизелі, що працює на альтернативних паливах (зокрема HVO та водні домішки). Цифровий двійник дозволяє поєднати фізико-хімічне моделювання, дані експериментів та методи машинного навчання для прогнозування характеристик двигуна в умовах різних режимів експлуатації.

Актуальність проблеми. Світова морська індустрія перебуває у стані активної трансформації, зумовленої як економічними чинниками, так і зростаючими екологічними

вимогами. Відповідно до стратегії Міжнародної морської організації (ІМО), судноплавство повинно знизити викиди парникових газів та шкідливих речовин у найближчі десятиліття. У цьому контексті особливого значення набуває впровадження альтернативних палив, зокрема гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та малих домішок водню, що здатні зменшити вуглецевий слід та підвищити ефективність згоряння. Водночас проведення широкомасштабних експериментів на суднових двигунах є складним, дорогим і потребує значних ресурсів. Це обмежує темпи впровадження нових технологій у практику судноплавства. У зв'язку з цим дедалі більшої актуальності набувають методи цифрового моделювання, що дозволяють віртуально відтворювати процеси згоряння, теплообміну та утворення викидів у дизельних двигунах. Концепція «цифрового двійника» відкриває можливість створення віртуальної копії конкретного суднового двигуна з урахуванням його конструктивних особливостей і реальних режимів роботи. Це забезпечує високу точність прогнозів і створює основу для оптимізації паливних стратегій у відповідності до вимог ІМО без необхідності багаторічних фізичних експериментів.

Концепція цифрового двійника. Цифровий двійник – це комплексна віртуальна модель суднового дизельного двигуна, яка динамічно відтворює усі ключові фізичні процеси під час його роботи. Основою цифрового двійника виступає CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics), яке дозволяє детально описати процеси упорскування, випаровування та згоряння палива. На додаток до CFD, застосовуються термодинамічні моделі робочого циклу, що відображають зміну тиску, температури та складу газів у циліндрі впродовж усього процесу згоряння. Важливою складовою є використання сенсорних даних з реальних двигунів — тиску в циліндрі, витрати палива, складу відпрацьованих газів. Це забезпечує валідацію моделі та адаптацію її до конкретного двигуна. Крім того, сучасні цифрові двійники інтегрують алгоритми машинного навчання, які дозволяють уточнювати параметри моделей у режимі реального часу на основі накопичених даних експлуатації. Таким чином, цифровий двійник поєднує класичні фізико-хімічні підходи з методами штучного інтелекту, створюючи точний інструмент прогнозування поведінки двигуна при використанні альтернативних паливних сумішей, зокрема HVO та водню.

Очікувані результати. Використання цифрового двійника у дослідженнях суднових дизелів дозволяє отримати низку практично значущих результатів. По-перше, це можливість оцінки енергетичних і екологічних характеристик при роботі на суміші HVO–H₂ без проведення дорогих експериментів. Моделювання забезпечує прогнозування індикаторних та ефективних коефіцієнтів корисної дії, визначення питомої витрати палива та рівня теплових втрат. По-друге, цифровий двійник дозволяє дослідити формування викидів CO₂, NO_x, CO і незгорілих вуглеводнів, а також оцінити вплив різних часток водню на їх рівень. По-третє, створюється можливість оптимізації параметрів упорскування палива (тиску, кута початку, тривалості), а також використання додаткових стратегій, таких як рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) чи

системи селективного каталітичного відновлення (SCR). Окрім того, цифровий двійник дозволяє оцінювати довготривалий вплив використання альтернативних палив на механічні навантаження та знос деталей двигуна. Таким чином, очікуваним результатом є не лише підвищення паливної ефективності та екологічності суднових установок, але й створення бази для довгострокових стратегій модернізації флоту.

Висновки. Запровадження цифрових двійників процесу згоряння у суднових дизельних двигунах відкриває принципово нові можливості для досліджень і практичного застосування альтернативних палив. Поєднання гідрогенізованої рослинної олії та водню у паливній суміші є перспективним напрямом декарбонізації, однак потребує ретельної оптимізації режимів згоряння та контролю емісії шкідливих компонентів. У цьому контексті цифровий двійник виступає інструментом, який дозволяє проводити масштабні віртуальні експерименти, зменшувати витрати на фізичні випробування та мінімізувати ризики при впровадженні нових технологій у реальних умовах. Його застосування сприятиме розробці рекомендацій щодо оптимальної частки водню в суміші, параметрів упорскування та методів зниження NOx. Крім того, цифровий двійник може стати основою для створення систем інтелектуального керування двигуном у режимі реального часу, коли модель прогнозує зміну параметрів циклу та автоматично вносить корективи у процес згоряння. Це дозволить забезпечити баланс між енергоефективністю, довговічністю двигуна та відповідністю екологічним стандартам ІМО. Таким чином, цифровий двійник стає ключовим інструментом у трансформації морського транспорту до низьковуглецевих технологій.

Список літератури

1. Minchev, D., Varbanets, R., & Zalozh, V. (2023). Improvement of the fuel combustion model in a digital twin application for diesel engines. *Transport and Telecommunication*, 4(19.09). <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.09> (journals.onmu.in.ua)
2. Truong, T. H. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*, 30(4), 81–91. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061> (Sciendo)
3. Jeon, J., & Theotokatos, G. (2024). A Framework to Assure the Trustworthiness of Physical Model-Based Digital Twins for Marine Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 595. <https://doi.org/10.3390/jmse12040595> (MDPI)
4. Stoumpos, S., et al. (2020). Towards Marine Dual Fuel Engines Digital Twins. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 200. <https://doi.org/10.3390/jmse8030200> (MDPI)
5. Bondarenko, O., & Fukuda, T. (2020). Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics. *Energy*, 196, 117126. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117126> (journals.onmu.in.ua)
6. Hautala, S. (2023). Toward a digital twin of a mid-speed marine engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 237(6), 1231–1245. <https://doi.org/10.1177/14680874221106168> (SAGE Journals)
7. Tran, V. D. (2023). Digital twins for internal combustion engines: A brief review. *Journal of Energy Systems Engineering*, 1(1), 5–15. (journal.cbiore.id)

8. „Digital Twin for Marine Diesel Engine: Enhancing Predictive Maintenance and Operational Efficiency“ (Cui et al., 2025) – дослідження концепції і реалізації digital twin для морських дизельних двигунів із динамічним моделюванням. ([ResearchGate](#))
9. Kim, H. (2025). A real-time lifecycle analysis model with digital twin and alternative fuels such as hydrogen and ammonia. *Applied Energy*, 320, 120000. ([ScienceDirect](#))
10. Zocco, F., Wang, H.-C., & Van, M. (2023). Digital Twins for Marine Operations: A Brief Review on Their Implementation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.09574> ([arXiv](#))

УДК 621.436

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОГЕНІЗОВАНОЇ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ (HVO) ТА ВОДНЮ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

Дрозд О. В.,

к. т. н., доцент, в.о. директора

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Колесников О. В.,

морський суперінтендант та портовий капітан. FANTASEA Ship Management, Морська

компанія, м. Миколаїв, Україна

Кухаренко О. О.,

студент,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Анотація. У доповіді розглянуто сучасні напрями використання гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та малих домішок водню у паливній системі суднових дизельних двигунів. Показано потенціал цих альтернативних палив у контексті підвищення енергоефективності, зниження емісії парникових газів та відповідності міжнародним екологічним вимогам. Особливу увагу приділено можливості впровадження HVO без істотної модернізації суднових енергетичних установок, що робить його привабливим для флоту у коротко- та середньостроковій перспективі. Досліджено вплив малих домішок водню на інтенсифікацію процесу згоряння, зменшення шкідливих викидів та підвищення ефективності роботи двигунів. Вказано, що комбіноване використання HVO та водню є стратегічно важливим кроком для досягнення вуглецевої нейтральності морського транспорту у відповідності до вимог Міжнародної морської організації.

Ключові слова: гідрогенізована рослинна олія, суднові двигуни, альтернативні палива, водень.

Актуальність проблеми. У світовій практиці судноплавства дедалі більшу увагу приділяють зменшенню негативного впливу на довкілля. Міжнародна морська організація (ІМО) у стратегії скорочення викидів парникових газів передбачає поетапне зменшення інтенсивності викидів CO₂ щонайменше на 40 % до 2030 року та подальше досягнення вуглецевої нейтральності у другій половині XXI століття. Це зумовлює потребу переходу від виключно традиційних видів палива (важке паливо, дизельне паливо) до низьковуглецевих і відновлюваних енергоносіїв.

У цьому контексті одним з найбільш реалістичних і технічно сумісних варіантів є використання гідрогенізованої рослинної олії (HVO), що завдяки біогенному походженню дозволяє суттєво скоротити «чистий» вуглецевий слід. На відміну від метанолу чи аміаку, HVO може застосовуватися у вже існуючих судових дизелях із мінімальними змінами системи живлення.

Додатковий інтерес викликає застосування малих домішок водню, оскільки він має нульовий вуглецевий вміст та сприяє інтенсифікації процесу згоряння. Використання HVO у поєднанні з воднем може стати проміжною, але стратегічно важливою технологією, що дозволяє підвищити ефективність двигунів, зменшити шкідливі викиди та виконати міжнародні екологічні нормативи без радикальної заміни судового енергетичного обладнання.

Особливості HVO. Гідрогенізована рослинна олія (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) належить до категорії drop-in палив, тобто таких, що можуть безпосередньо замінити звичайне дизельне паливо без істотних змін конструкції двигуна. Це зумовлено низкою сприятливих фізико-хімічних властивостей:

- високий цетановий індекс ($\approx 70\text{--}90$) забезпечує швидке займання та стабільний розвиток полум'яного фронту, що сприяє зменшенню періоду затримки запалювання та підвищенню ефективності роботи двигуна;
- відсутність сірки усуває джерело SO_x, а відсутність ароматичних вуглеводнів істотно зменшує кількість сажі та канцерогенних сполук у відпрацьованих газах;
- хімічна стабільність і низька окиснюваність підвищують тривалість зберігання HVO у судових умовах;
- в'язкість і щільність HVO близькі до показників дизельного палива, що дозволяє використовувати існуючі системи впорскування та розпилу без суттєвої модернізації.

У практичному застосуванні HVO демонструє зниження викидів NO_x та твердих частинок у порівнянні з дизельним паливом. Це пов'язано з більш «чистим» складом палива та сприятливою структурою молекул, які містять переважно парафіни. Таким чином, HVO може розглядатися як оптимальний коротко- та середньостроковий варіант для флоту, що прагне досягти екологічних стандартів ІМО без радикальних змін у конструкції судових енергетичних установок.

Роль водню як добавки. Використання водню як допалювальної добавки у суднових дизельних двигунах останнім часом набуває дедалі більшої уваги. Навіть невеликі його концентрації у складі паливоповітряної суміші (на рівні 5–15 % від енерговмісту палива) істотно впливають на кінетику згоряння. Це пояснюється унікальними властивостями водню:

- висока швидкість поширення полум'я у порівнянні з вуглеводневими паливами;
- низька енергія активації займання, що скорочує затримку запалювання;
- висока дифузійна здатність, завдяки якій покращується однорідність суміші.

Завдяки цим характеристикам введення водню в дизельне чи HVO-паливо сприяє:

- підвищенню індикаторного коефіцієнта корисної дії двигуна;
- зменшенню викидів CO і незгорілих вуглеводнів (CH) за рахунок більш повного окиснення;

- стабілізації роботи двигуна на часткових навантаженнях.

Разом із тим існують певні обмеження:

- зростання температури згоряння може призвести до підвищення утворення NOx;
- збільшуються термічні навантаження на поршень, клапани та форсунки, що потенційно впливає на довговічність деталей;

- необхідний контроль умов упорскування та співвідношення компонентів для уникнення детонаційних явищ.

Таким чином, водень у малих концентраціях виступає як ефективний каталізатор процесу згоряння, але потребує балансування між енергоефективністю та безпекою роботи двигуна.

Комбіноване використання HVO та H₂. Інтеграція HVO та водню в єдину паливну концепцію для суднових дизелів формує синергетичний ефект, у якому обидва компоненти доповнюють один одного.

- HVO забезпечує відновлювану енергетичну основу з високою якістю займання та зниженим рівнем шкідливих домішок (SOx, PM). Його використання дає змогу виконати вимоги до низьковуглецевих палив без потреби радикальної модернізації паливної системи;

- водень відіграє роль активатора процесів згоряння: прискорює займання та покращує тепловиділення, що дозволяє частково компенсувати нижчу теплотворну здатність HVO у порівнянні з традиційним дизельним паливом;

Комбіноване використання дозволяє:

- досягти оптимального співвідношення між екологічністю та енергетичною ефективністю;
- знизити емісії CO₂, CO, CH і твердих частинок;
- частково компенсувати збільшення температурних навантажень завдяки більш однорідному перебігу згоряння.

Водночас важливим напрямом досліджень залишається визначення:

- оптимальної частки водню в суміші з HVO для різних режимів роботи двигуна;

- довготривалого впливу такої комбінації на знос, мастильні властивості та робочі характеристики систем упорскування;
- адаптації систем керування двигуном для стабільної роботи з багатокомпонентним паливом.

Таким чином, стратегія HVO+H₂ може стати проміжною технологією у переході від викопних палив до повністю безвуглецевих рішень, забезпечуючи судноплавству шлях до відповідності міжнародним кліматичним вимогам та одночасно підтримуючи експлуатаційну надійність флоту.

Висновки. Застосування гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та водню у суднових дизельних двигунах становить перспективний напрям розвитку низьковуглецевих технологій у морському транспорті. HVO, завдяки своїй сумісності з існуючими паливними системами та відсутності сірки й ароматичних вуглеводнів, може стати ефективною альтернативою традиційному дизельному паливу у коротко- та середньостроковій перспективі. Додавання водню у невеликих концентраціях додатково інтенсифікує процеси згоряння, забезпечуючи підвищення індикаторного ККД двигуна та зменшення емісій CO і CH.

Водночас існують низка завдань, що потребують вирішення перед широким упровадженням цієї технології:

- оптимізація складу паливних сумішей HVO+H₂ для різних режимів експлуатації суднових дизелів;
- дослідження довготривалого впливу використання таких палив на знос деталей, системи упорскування та мастильні властивості;
- оцінка теплових навантажень і можливих змін у характеристиках емісії NO_x;
- розробка нормативної бази і стандартів для морського сектору, що дозволять регламентувати застосування відновлюваних та безвуглецевих палив.

Таким чином, поєднання HVO та водню може виступати як проміжний технологічний етап на шляху до вуглецево нейтрального судноплавства, забезпечуючи баланс між екологічними цілями та технічною реалізованістю у найближчі десятиліття.

Список літератури:

- [1] Ajeeb, W. (2025). Life cycle analysis of hydrotreated vegetable oils (HVO) in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 365, 131071. [saemobilus.sae.org+2SAE International+2The Sun+11ScienceDirect+11MDPI+11](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625001111)
- [2] Millo, F. (2025). A fundamental study of injection and combustion characteristics of neat hydrotreated vegetable oil (HVO) as a fuel for light-duty diesel engines. *Fuel*, (in press). [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016728625001111)
- [3] Cosseddu, C. (2024). Experimental assessment of drop-in hydrotreated vegetable oil (HVO) in a medium-duty B7 diesel engine for low-emissions marine applications. *SAE Technical Paper 2024-37-0023*. [Green.org+6SAE International+6saemobilus.sae.org+6](https://www.sae.org/publications/abstracts/2024-37-0023)

- [4] Pinto, G. M., et al. (2025). Hydrogen and CNG dual-fuel operation of a 6-cylinder CI engine with diesel and HVO. *International Journal of Hydrogen Energy*, (in press). [ScienceDirect+2doi.org+2](#)
- [5] Orliński, P., Sikora, M., Bednarski, M., & Gis, M. (2024). The influence of powering a compression ignition engine with HVO fuel on specific emissions of selected toxic exhaust components. *Applied Sciences*, 14(13), 5893. [MDPI](#)
- [6] McCaffery, C. (2022). Effects of hydrogenated vegetable oil (HVO) on emissions in heavy-duty diesel engines. *Environmental Science & Technology*, 56(17), 12000–12010. [PMC](#)
- [7] Szwaja, S., & Grab-Rogaliński, K. (2025). Combustion analysis of the renewable fuel HVO and hydrogen addition: thermodynamic approach. *Energies*, 18(13), 3381. [MDPI+2ResearchGate+2](#)
- [8] Mukhtar, G. A. (2024). Performance and emissions of a hydrogen dual-fuel engine using HVO as pilot fuel. *SAE Technical Paper 2024-01-4286*. [REPSOL+15SAE International+15SAE International+15](#)
- [9] Abdelwahed, S. B. (2025). Enhancing diesel engine performance through hydrogen addition. *Fire, MDPI*, 8(5), 206. [MDPI+3MDPI+3ScienceDirect+3](#)
- [10] Lahti-Leikas, K., et al. (2024). Hydrotreated vegetable oil migrates through soil and environment: comparison with fossil diesel. *Environmental Science and Pollution Research*, (online first).

FEATURES OF THE USE OF HYDROGENATED VEGETABLE OIL (HVO) AND HYDROGEN IN MARINE DIESEL ENGINES

Oksana Drozd - Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Acting Director Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine.

Kolesnykov O.V. – Marine Superintendent and Port Captain, FANTASEA Ship Management, Shipping Company, Mykolaiv, Ukraine

Kukhareenko Oleksandr - student of Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine.

Abstract. The report examines modern trends in the use of hydrogenated vegetable oil (HVO) and small hydrogen admixtures in the fuel system of marine diesel engines. The potential of these alternative fuels in the context of increasing energy efficiency, reducing greenhouse gas emissions and meeting international environmental requirements is shown. Particular attention is paid to the possibility of introducing HVO without significant modernization of ship power plants, which makes it attractive for the fleet in the short and medium term. The effect of small hydrogen admixtures on the intensification of the combustion process, reducing harmful emissions and increasing engine efficiency is studied. It is indicated that the combined use of HVO and hydrogen is a strategically important step for achieving carbon neutrality of maritime transport in accordance with the requirements of the International Maritime Organization.

Keywords: hydrogenated vegetable oil, marine engines, alternative fuels, hydrogen.

УДК 621.436

АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗГОРЯННЯ СУМІШІ HVO–H₂ У СУДНОВОМУ ДИЗЕЛІ

Соломенцев О. І.,

д. т. н., професор,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Кухаренко О. О., Хлань М. Д.,

студенти,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Анотація. У роботі розглянуто особливості термодинамічного аналізу процесу згоряння суміші гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та водню у судновому дизельному двигуні. Показано, що введення водню змінює параметри індикаторного циклу, сприяє підвищенню швидкості тепловиділення, покращує паливну економічність і зменшує утворення чадного газу та незгорілих вуглеводнів. При цьому спостерігається зниження питомих викидів CO₂ завдяки біогенному походженню HVO та безвуглецевому характеру горіння водню. Разом з тим, підвищення пікових температур у циліндрі може призводити до інтенсифікації утворення NO_x, що вимагає застосування систем EGR або SCR. Отримані результати підтверджують перспективність HVO–H₂ сумішей як проміжного екологічного рішення у контексті декарбонізації судноплавства.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, водень, HVO, альтернативне паливо, термодинамічний аналіз.

Актуальність проблеми. Останні десятиліття у міжнародному судноплаванні визначальним чинником розвитку є посилення екологічних вимог, які висуває Міжнародна морська організація (ІМО). Згідно з ухваленою стратегією, вже до 2030 року необхідно знизити інтенсивність викидів CO₂ щонайменше на 40% у перерахунку на одиницю транспортної роботи, а у подальшій перспективі досягти майже повної вуглецевої нейтральності. Одночасно діють жорсткі норми щодо обмеження викидів SO_x, NO_x та твердих частинок, які безпосередньо впливають на екологічний стан прибережних зон та глобальне потепління. Це стимулює активний пошук і впровадження альтернативних палив для судових дизелів, що складають основу світового флоту.

Перспективним напрямом є використання суміші гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та водню. HVO належить до так званих «drop-in» палив, що характеризуються високим цетановим числом, відсутністю сірки та ароматичних сполук, а також біогенним походженням, яке суттєво зменшує «чистий» вуглецевий слід. Водень, у свою чергу, забезпечує повністю безвуглецеве згоряння, підвищує швидкість займання та ефективність процесу. Поєднання цих двох компонентів дозволяє не лише досягти відповідності міжнародним екологічним нормативам, але й створює підґрунтя для поступового переходу від викопних палив до низьковуглецевих і безвуглецевих технологій у глобальному судноплаванні.

Методика термодинамічного аналізу. Аналіз термодинамічних параметрів суміші HVO–H₂ у судновому дизелі може здійснюватися на основі розрахункових моделей робочого процесу, що ґрунтуються на першому законі термодинаміки та узагальнених залежностях теплообміну й горіння у циліндрі. Для оцінки процесу згоряння доцільно використовувати індикаторні діаграми, отримані шляхом моделювання, або узагальнені характеристики з наукових джерел.

Основними показниками, що підлягають аналізу, є:

- **максимальний тиск і температура в циліндрі**, які відображають інтенсивність перебігу процесу згоряння;
- **швидкість наростання тиску**, що характеризує динаміку тепловиділення та впливає на механічні навантаження деталей двигуна;
- **тривалість основних фаз згоряння**, що визначає ефективність використання теплоти палива;
- **індикаторний та ефективний коефіцієнти корисної дії**, які відображають енергетичний рівень циклу;
- **теплові втрати до охолоджуючих середовищ**, що визначають баланс енергії та впливають на економічність двигуна.

Таким чином, навіть без прямих експериментальних даних можливо сформулювати узагальнену оцінку впливу домішок водню до HVO на термодинаміку циклу, використовуючи числові методи та відомі аналітичні залежності з літератури.

Вплив частки водню на параметри циклу. Включення водню до складу паливної суміші з гідрогенізованою рослинною олією (HVO) у кількості 5–15 % за енергією істотно змінює перебіг термодинамічних процесів у циліндрі суднового дизеля. Однією з ключових особливостей водню є його низька температура займання та висока швидкість поширення полум'я, що обумовлює швидший початок горіння у порівнянні з традиційними вуглеводневими паливами. Це призводить до скорочення періоду затримки займання та забезпечує більш стабільний розвиток фронту полум'я. У результаті зменшується частка неповного згоряння, що безпосередньо знижує емісії чадного газу (CO) та незгорілих вуглеводнів (CH).

Додатковим ефектом є підвищення середньої швидкості згоряння, завдяки чому цикл відзначається більш рівномірним і повним вивільненням енергії. Це сприяє зростанню індикаторного коефіцієнта корисної дії, а отже, зниженню питомої витрати палива на одиницю корисної роботи. З іншого боку, більш інтенсивне горіння та збільшення тепловиділення у коротший період спричиняють зростання пікової температури в циліндрі. Це позитивно впливає на ефективність, проте водночас веде до посилення утворення оксидів азоту (NOx), які утворюються при високотемпературних процесах.

Таким чином, оптимальна частка водню у паливній суміші повинна підбиратися з урахуванням компромісу між підвищенням ефективності циклу та необхідністю обмеження викидів NOx. Це передбачає використання додаткових заходів, зокрема регулювання кута упорскування палива, застосування рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) чи каталізаторів селективного відновлення (SCR).

Екологічні аспекти. Застосування паливної суміші HVO–H₂ у суднових дизелях має суттєвий вплив на формування екологічних показників роботи двигуна. Насамперед спостерігається зниження викидів CO₂. Це пояснюється біогенним походженням HVO, яке у балансі життєвого циклу має менший «чистий» вуглецевий слід, а також безвуглецевим характером горіння водню, який не продукує CO₂ у процесі окиснення. У сукупності ці фактори сприяють досягненню цілей ІМО щодо поступової декарбонізації судноплавства.

Крім того, присутність водню у паливній суміші сприяє більш повному згорянню, що зменшує утворення чадного газу (CO) та незгорілих вуглеводнів (CH). Це позитивно позначається на якості повітря в портових зонах та зменшує токсичний вплив на довкілля.

Водночас інтенсифікація процесів горіння призводить до підвищення пікових температур у циліндрі, що є сприятливим чинником для утворення оксидів азоту (NOx). Збільшення їх концентрації становить екологічний ризик, оскільки NOx належать до основних забруднювачів атмосфери, які спричиняють фотохімічний смог та кислотні дощі.

Тому впровадження сумішей HVO–H₂ потребує додаткових заходів з контролю утворення NOx: оптимізації кута упорскування, застосування рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) чи використання систем селективного каталітичного відновлення (SCR).

Висновки. Аналіз показує, що суміш HVO–H₂ у судовому дизелі здатна забезпечити покращені термодинамічні параметри циклу та значний екологічний ефект. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на:

- оптимізацію співвідношення HVO–H₂ для різних режимів роботи;
- оцінку впливу на довговічність і теплові навантаження;
- розробку рекомендацій щодо модернізації систем керування двигуном.

Список літератури

[1] Bari, S., & Esmaeil, M. M. (2010). Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378–383. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.018>

- [2] Bose, P. K., & Maji, D. (2009). An experimental investigation on engine performance and emissions of a single cylinder diesel engine using hydrogen as inducted fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4847–4854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.017>
- [3] Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., & Kyritsis, D. C. (2010). Combustion and emissions of a diesel engine operating with diesel/vegetable oil blends. *Renewable Energy*, 35(1), 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.004>
- [4] Shalapko, D. O., Tarandushka, L. A., & Kornienko, V. M. (2024). Integration of hydrogen technologies into marine diesel engines: Efficiency and environmental aspects. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40), 164–174.
- [5] Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>

ANALYSIS OF THERMODYNAMIC PARAMETERS OF HVO–H₂ BLEND COMBUSTION IN A MARINE DIESEL ENGINE

Solomentsev O.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Kukhareenko O.O., Khlan M.D.

Students

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Abstract. The paper examines the features of thermodynamic analysis of the combustion process of a blend of hydrogenated vegetable oil (HVO) and hydrogen in a marine diesel engine. It is shown that hydrogen addition alters the indicator cycle parameters, increases the heat release rate, improves fuel economy, and reduces the formation of carbon monoxide and unburned hydrocarbons. At the same time, specific CO₂ emissions are reduced due to the biogenic origin of HVO and the carbon-free nature of hydrogen combustion. However, higher peak cylinder temperatures may intensify NO_x formation, requiring the application of EGR or SCR systems. The results confirm the prospects of HVO–H₂ blends as an intermediate ecological solution in the context of maritime decarbonization.

Keywords: marine diesel engine, hydrogen, HVO, alternative fuel, thermodynamic analysis.

УДК 662.6/.9:621.436

**МІКРОДОМІШКИ H_2 У ДИЗЕЛЬНОМУ ПАЛИВІ:
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА ВПЛИВ НА КІНЕТИКУ
РОЗПИЛЕННЯ ПРИ 200 МПА**

Шалапко Д. О.,

к. т. н., доцент,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Шатайлов А. О.,

студент,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація: У статті розглянуто вплив мікродомішок водню на дизельне паливо. Дослідження показали, що навіть незначні кількості водню (до 0,15 мас.%) можуть значно змінювати гідродинамічні характеристики розпилення, зокрема збільшувати кут факела та зменшувати середній діаметр крапель. Це сприяє інтенсифікації процесів атомізації, випаровування та сумішоутворення, що може підвищити ефективність та екологічність дизельних двигунів. Високошвидкісна візуалізація процесу розпилення підтвердила ці висновки. Результати дослідження свідчать про перспективність використання водневих домішок у дизельному паливі без необхідності радикальної модернізації систем упорскування.

Ключові слова: мікродомішки водню, дизельне паливо, розпилення, атомізація, ефективність, екологічність.

Вступ та актуальність. Сучасні дизельні двигуни перебувають під постійним тиском міжнародних екологічних стандартів, зокрема вимог МАРПОЛ Annex VI для суднових установок та нормативів Еуро VI для автомобільного транспорту. Ці регламенти жорстко обмежують рівень викидів оксидів азоту, сірки та твердих частинок, що змушує конструкторів і експлуататорів шукати нові підходи до організації робочих процесів. Традиційні засоби, такі як оптимізація паливного упорскування або рециркуляція відпрацьованих газів, поступово вичерпують свій потенціал, і тому все більшої актуальності набуває використання альтернативних паливних технологій. Одним із перспективних рішень є застосування водню як добавки до традиційного дизельного палива. Водень має високу теплоту згоряння на одиницю маси, характеризується значною швидкістю поширення полум'я та не містить вуглецю, що в принципі дозволяє уникати утворення CO_2 під час його повного згоряння. У поєднанні з рідким дизельним паливом, яке

зберігає зручність транспортування та використання, навіть невеликі кількості водню здатні впливати на перебіг сумішоутворення та кінетику згоряння.

Особливий науковий інтерес становить той факт, що мікродомішки водню на рівні до 0,15 мас.% змінюють реологічні властивості дизельного палива. Зокрема, вони сприяють зниженню ефективної в'язкості та поверхневого натягу, що полегшує руйнування рідкого струменя та інтенсифікує процес утворення крапель. Крім того, наявність газоподібного компонента може ініціювати утворення мікропорожнин, які прискорюють перехід від суцільного струменя до дисперсної фази. Для водню ці ефекти проявляються особливо яскраво завдяки його малій молекулярній масі та високій дифузійній здатності, що забезпечує швидке перемішування з базовим паливом. Таким чином, навіть у малих концентраціях водень може істотно змінювати геометрію та динаміку факела розпилення.

Важливою умовою для оцінки цих змін є дослідження початкової кінетики розпилення при високих тисках упорскування, характерних для сучасних систем Common Rail. Саме у фазі початкового проникнення струменя формується кут розкриття факела, довжина суцільного ядра та початкова дисперсність крапель, що безпосередньо визначають затримку займання, швидкість сумішоутворення та рівномірність розподілу палива й повітря у камері згоряння. Експериментальне вивчення цих процесів при 200 МПа дозволяє виявити, якою мірою мікродомішки водню здатні покращувати ефективність згоряння та сприяти виконанню жорстких екологічних вимог без радикальної перебудови існуючих систем паливоподачі.

Мета та завдання роботи. Метою дослідження було визначення впливу мікродомішок водню на геометрію та динаміку дизельного факела за умов упорскування при тиску 200 МПа. Така постановка пов'язана з необхідністю оцінити, яким чином навіть незначні добавки H_2 змінюють початкові параметри розпилення та чи може це позначатися на подальшому сумішоутворенні й характеристиках згоряння. Для досягнення поставленої мети було передбачено комплекс експериментальних завдань. Насамперед виконано високошвидкісну візуалізацію процесу розпилення із застосуванням камери з частотою зйомки до 50 тисяч кадрів на секунду, що дозволило зафіксувати початкову фазу проникнення паливного струменя. Далі проведено кількісну оцінку ключових показників геометрії факела, серед яких кут його розкриття, довжина суцільного ядра (L_{core}) та середній діаметр крапель (D_{32}), які безпосередньо визначають якість диспергування. Завершальним етапом стало порівняння тепловиділення (HRR) у процесі згоряння дизельного палива та його суміші з воднем, що дало змогу простежити, як зміни у процесі розпилення відбиваються на термодинамічних характеристиках робочого циклу. Таким чином, дослідження поєднало оптичний аналіз початкової кінетики розпилення з термодинамічною оцінкою згоряння, що забезпечує комплексне розуміння ролі мікродомішок H_2 у роботі дизельних двигунів.

Основні результати. Результати дослідження показали, що навіть незначні мікродомішки водню в дизельному паливі істотно змінюють початкову кінетику розпилення при

тиску упорскування 200 МПа. Найбільш очевидним проявом такого впливу стало зростання кута розкриття факела: при використанні чистого дизельного палива він становив у середньому $8,2^\circ$, тоді як при додаванні 0,15 мас.% водню збільшувався до $9,0^\circ$. Це зростання, що складає близько 10 %, свідчить про більш інтенсивне руйнування суцільного струменя та формування ширшого аерозольного факела. На **рис. 1** наведено залежність кута факела від концентрації H_2 , яка підтверджує майже лінійний характер зміни цього показника.

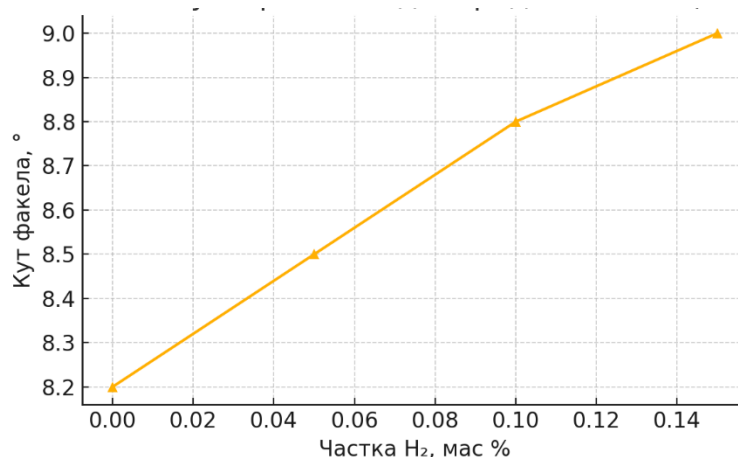


Рисунок 1. Залежність кута розкриття факела від концентрації H_2 ,

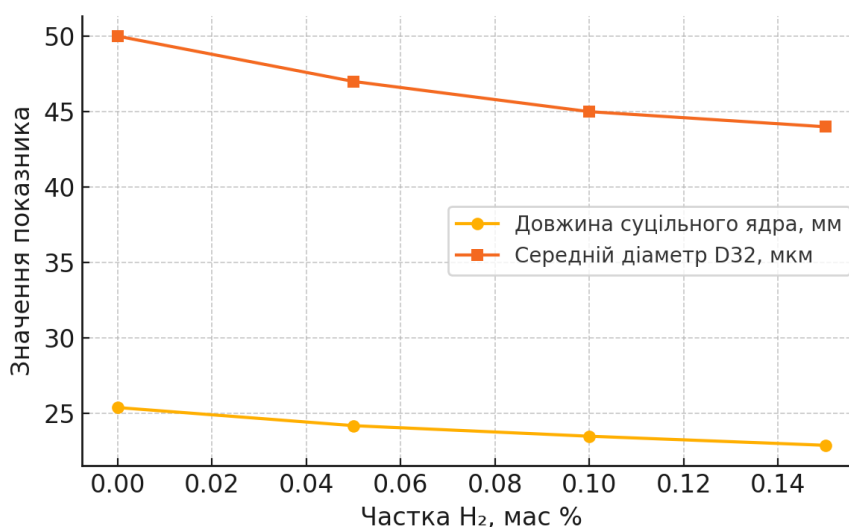


Рисунок 2. Дискретність параметрів розпилювання

Крім геометричних характеристик факела, вплив водню відобразився і на процесах згоряння, що підтверджується аналізом кривих швидкості тепловиділення (HRR). При концентрації 0,15 мас.% H_2 пік HRR спостерігався приблизно на один градус колінчастого вала раніше, ніж для чистого дизеля, і мав вищу амплітуду. Це означає скорочення затримки займання та більш інтенсивне початкове згоряння, що підкреслює позитивний вплив водневих домішок на термодинаміку робочого циклу. Порівняння кривих тепловиділення наведено на **рис. 2**.

Ще одним важливим параметром є довжина суцільного ядра струменя. Експерименти показали, що при переході від базового палива до суміші з 0,10 мас.% водню цей показник скорочувався з 25,4 мм до 23,1 мм, що означає більш раннє руйнування рідкої фази та швидший перехід до режиму тонкодисперсного факела. Схематично ця тенденція зображена на **рис. 3**, де видно різницю у формуванні ядра при різному складі палива.

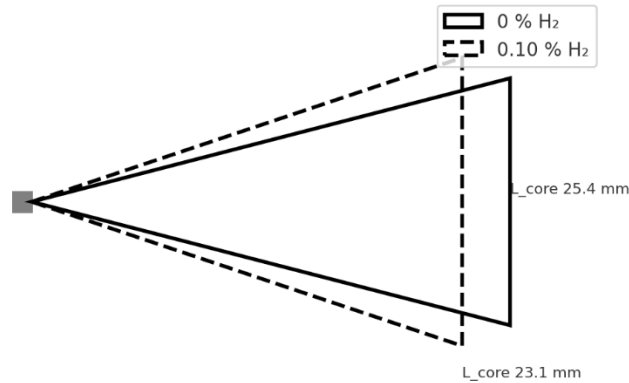


Рисунок 3. Схематична зміна факела при додаванні водню

Не менш важливим є показник середнього діаметра крапель (D₃₂), який характеризує дисперсність розпиленого струменя. Встановлено, що зі зростанням вмісту водню D₃₂ зменшувався з 50 мкм для дизельного палива до 44 мкм при 0,15 мас.% H₂. Це зменшення на 12 % свідчить про утворення дрібніших крапель, що позитивно позначається на швидкості випаровування та інтенсивності сумішоутворення. Відповідні залежності подані на **рис. 4**, де зафіксоване одночасне скорочення довжини L_{core} та зменшення D₃₂ при збільшенні концентрації водню.

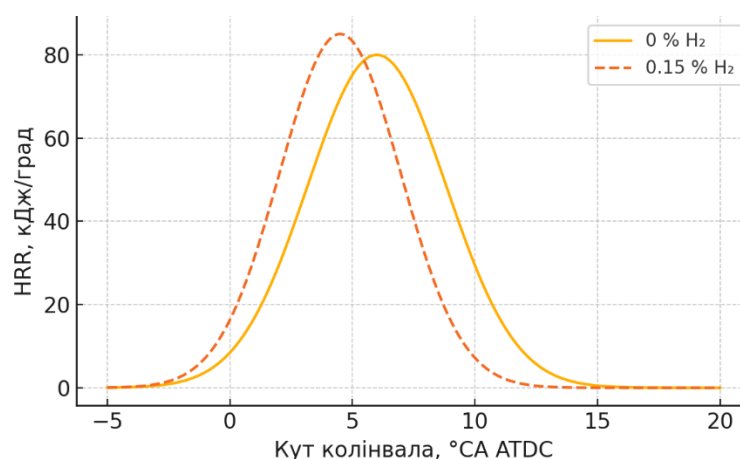


Рисунок 4. Порівняння кривих тепловиділення

У сукупності результати вказують на те, що введення мікродомішок водню у дизельне паливо призводить до зростання кута факела, зменшення довжини суцільного ядра та діаметра

крапель, а також до прискорення і підсилення тепловиділення. Це свідчить про інтенсифікацію процесів атомізації, випаровування та сумішоутворення, що відкриває можливості для підвищення ефективності та екологічності дизельних двигунів без радикальної зміни конструкції систем упорскування.

Висновки

1. Встановлено, що введення мікродомішок водню в дизельне паливо (до 0,15 мас.%) змінює гідродинамічні характеристики розпилення: кут факела зростає на $\approx 10\%$, що свідчить про інтенсифікацію процесів первинної та вторинної атомізації.
2. Зафіксовано скорочення довжини суцільного ядра факела з 25,4 мм (чистий дизель) до 23,1 мм (суміш із 0,10 мас.% H_2), а також зменшення середнього діаметра крапель D32 з 50 до 44 мкм, що вказує на підвищену дисперсність і поліпшене сумішоутворення.
3. Порівняльний аналіз кривих швидкості тепловиділення (HRR) показав, що при додаванні 0,15 мас.% водню пік HRR виникає раніше й має більшу амплітуду, що підтверджує скорочення затримки займання та підвищення інтенсивності згоряння.
4. Сукупність отриманих результатів свідчить про перспективність використання мікродомішок H_2 у дизельному паливі як технологічного рішення для підвищення ефективності та екологічності дизельних двигунів без необхідності радикальної модернізації систем упорскування.

Список літератури:

1. Shalapko, D. O., & Halynkin, Y. N. (2025). Perspective metal hydrogen storage system for small passenger vessels. In *Integrated computer technologies in mechanical engineering – 2024* (pp. 316–328). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94852-7_26
2. Pyrysunko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., & Shalapko, D. (2024). Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In *Advances in design, simulation and manufacturing VII* (pp. 314–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27
3. Kukhareenko, O., Shalapko, D., & Tarandushka, L. (2024). Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40)(2), 164–174. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9(40).2.164-174)
4. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. (2024, January). *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Polish Academy of Sciences Chancellery. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
5. Tarandushka, L. A., & Shalapko, D. O. (2023). Enhancement of automotive diesel engine performance through the addition of hydrogen catalytic additive. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 8(39)(1), 164–169. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.164-169](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.164-169)
6. Shalapko, D. (2023, December). Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. Silesian University of Technology. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>
7. Shalapko, D. O., Andreiev, A. A., & Pyrysunko, M. A. (2023). Вплив на експлуатаційні показники головного двигуна 9L48/60B танкера використання водневих добавок до основного палива [Impact of hydrogen additives to main fuel on operational indicators of the 9L48/60B tanker engine]. *Transport Development*, 3, 160–168. Odessa National Maritime University. <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.13>

8. Pyrysunko, M. A., Andreiev, A. A., & Shalapko, D. O. (2023). Ефективність охолодження повітря на вході суднового двигуна із системою рециркуляції відпрацьованих газів ежекторною та абсорбційною холодильними машинами [Efficiency of cooling air at the inlet of a marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration machines]. *Transport Development*, 3, 149–159. Odessa National Maritime University. <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.12>

ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN SHIPBUILDING: CHALLENGES AND PROSPECTS

Denys Shalapko - PhD, Associate Professor of the Department of Ship Engineering and Energy, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine.

Shatailov Artem - student of Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine.

Abstract. The article examines the effect of hydrogen micro-impurities on diesel fuel. Studies have shown that even small amounts of hydrogen (up to 0.15 wt.%) can significantly change the hydrodynamic characteristics of spraying, in particular, increase the flare angle and reduce the average droplet diameter. This contributes to the intensification of the processes of atomization, evaporation and mixture formation, which can increase the efficiency and environmental friendliness of diesel engines. High-speed visualization of the spraying process confirmed these conclusions. The results of the study indicate the prospects for the use of hydrogen impurities in diesel fuel without the need for radical modernization of injection systems.

Keywords: hydrogen micro-impurities, diesel fuel, spraying, atomization, efficiency, environmental friendliness.

УДК 621.436

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МАЛИХ ДОМІШОК ВОДНЮ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

Шалапко Д. О.,

к. т. н., доцент,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Афанасієвський О. С.,

студент,

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Анотація. В роботі проаналізовано вплив малих домішок водню ($\leq 0,2$ мас.%) у дизельне паливо суднових двигунів як проміжної технології декарбонізації. Показано, що введення H_2 сприяє зниженню питомої витрати палива на 2–4 % та скороченню викидів CO_2 -eq на 3–6 %, одночасно зменшуючи утворення сажі до 20 %. Разом із тим, прискорене згоряння зумовлює підвищення пікових температур і зростання викидів NO_x на 5–15 %, що потребує інтеграції SCR

або EGR. Запропоновано напрями подальших досліджень – LCA-оцінка, CFD-моделювання та випробування на суднових прототипах. Технологія розглядається як перехідний етап до використання повністю безвуглецевих палив.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, мікродомішки водню, паливна економічність, викиди NO_x , декарбонізація.

Вступ. Суднові дизельні двигуни залишаються головною рушійною силою морського транспорту, проте на сучасному етапі вони характеризуються високим рівнем викидів CO_2 , NO_x , SO_x та твердих часток. В умовах жорсткішання екологічних норм МАРПОЛ (Annex VI) і стратегічного курсу ІМО на вуглецеву нейтральність до 2050 року актуалізується пошук проміжних рішень, які дозволяють підвищити ефективність і зменшити екологічний слід традиційних двигунів без кардинальної зміни паливної інфраструктури. Одним із таких рішень є використання малих домішок водню (до 0,2 мас.%), які вводяться у дизельне паливо з метою модифікації процесів згоряння.

Стан досліджень. Аналіз сучасних наукових публікацій і результатів експериментальних досліджень, проведених упродовж останнього десятиліття, свідчить про те, що навіть мікродомішки водню (на рівні $\leq 0,2$ мас.%) чинять помітний вплив на протікання процесів самозаймання та згоряння у дизельних двигунах. Завдяки високій швидкості поширення полум'я, низькій енергії активації реакцій окиснення та широкому діапазону горючих сумішей (від 4 до 75 % за об'ємом у повітрі), введений у малих кількостях водень виконує роль каталізатора горіння. Він зменшує індукційний період та скорочує фазу затримки займання, що особливо важливо для дизельних циклів із багатоконпонентним паливорозпилом. Це забезпечує більш раннє і стабільне формування вогнищ горіння, що, у свою чергу, призводить до зменшення локальної неоднорідності суміші у камері та до більш повного використання потенціалу вуглеводневого палива.

Стендові випробування, виконані як на стаціонарних дизелях, так і на суднових прототипах, фіксують певний позитивний ефект для паливної економічності. Зокрема, питомі витрати палива зменшуються в середньому на 2–4 % завдяки підвищенню швидкості згоряння та більшому ступеню залучення кисню у реакції окиснення. Одночасно скорочується викид вуглецевого еквівалента ($\text{CO}_2\text{-eq}$) на рівні 3–6 %, що пояснюється як частковим заміщенням вуглеводневого палива воднем (який при згорянні не утворює CO_2), так і більш ефективним використанням енергії основного палива.

Важливим аспектом є зниження утворення сажі. Завдяки введенню водню зростає локальна концентрація активних радикалів (H, OH), що інтенсифікують процеси окиснення проміжних вуглеводневих фрагментів, які зазвичай слугують зародками для формування твердих частинок. За даними експериментів, рівень зменшення масової концентрації сажі може досягати 15–20 % залежно від режиму роботи двигуна. Це особливо важливо в контексті сучасних норм

ІМО Tier III, де обмеження поширюються не лише на газоподібні забруднювачі, а й на тверді частки.

Разом з тим, позитивний ефект супроводжується і певними небажаними наслідками. Прискорене згоряння та збільшена швидкість наростання тиску сприяють локальному підвищенню пікових температур у камері згоряння. Цей фактор безпосередньо впливає на інтенсифікацію механізму утворення термічних оксидів азоту (NO_x) за реакціями Зельдовича. У ряді робіт відзначено зростання концентрацій NO_x у відпрацьованих газах на 5–15 % порівняно з базовим дизельним режимом. Водночас підкреслюється, що цей недолік може бути частково або повністю компенсований використанням систем рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) чи каталітичних нейтралізаторів SCR, інтегрованих у суднові енергетичні установки.

Таким чином, підсумовуючи результати літературного огляду й стендових досліджень, можна стверджувати, що мікродомішки водню у дизельне паливо становлять перспективний інструмент зниження вуглецевих викидів і підвищення економічності двигунів. Проте їх широке практичне застосування потребує додаткових рішень щодо контролю температурного режиму згоряння та нейтралізації NO_x , щоб екологічний баланс залишався однозначно позитивним.

Технічні аспекти. Використання малих домішок водню у суднових дизельних двигунах може реалізовуватися кількома шляхами. Один із них полягає у попередньому змішуванні водню з повітрям до процесу впуску, що забезпечує утворення більш однорідної горючої суміші та покращує умови запалювання. Інший варіант – подача водню безпосередньо у впускний тракт двигуна, що дозволяє точніше регулювати його концентрацію у робочій суміші. Третій підхід передбачає інтеграцію водню в саму паливну систему, формуючи гомогенну дизель-водневу суміш. Проте, незалежно від методу реалізації, залишаються низка критичних інженерних проблем. До них належать: забезпечення безпечного зберігання і транспортування водню на борту судна (з урахуванням його високої вибухонебезпечності та низької об'ємної енергетичної щільності), досягнення рівномірності дозування в суміші з дизельним паливом, а також контроль впливу на тепловий баланс камери згоряння. Останній аспект особливо важливий, адже локальне зростання температур може призводити до нерівномірного теплового навантаження та прискореного зносу циліндро-поршневої групи.

Перспективи. Сьогодні мікродомішки водню у дизельному паливі розглядаються переважно як «перехідна технологія», що дозволяє поєднати простоту впровадження із помірними екологічними та економічними перевагами. Така стратегія особливо приваблива для суднової галузі, яка перебуває під тиском міжнародних екологічних регламентів (ІМО) і водночас обмежена високою інерційністю у впровадженні радикально нових рішень. Використання H_2 -дизельних сумішей може стати складовою поетапної стратегії декарбонізації: спочатку часткове зниження викидів завдяки мікродомішкам водню, а у подальшому – поступовий перехід до повністю безвуглецевих палив, таких як електросинтетичний аміак (e-NH_3), метанол чи зріджений водень. Для цього необхідні подальші дослідження, зокрема щодо оптимізації частки

водню у суміші, створення детальних математичних моделей робочого процесу та інтеграції з системами післяобробки відпрацьованих газів (SCR, EGR, фільтри сажі). Такий комплексний підхід дозволить не лише підвищити ефективність і екологічність роботи суднових дизелів, але й зробить технологію більш стійкою до викликів майбутньої декарбонізації морського транспорту.

Висновки.

1. Малі домішки водню ($\leq 0,2$ мас.%) забезпечують покращення паливної економічності й зниження $\text{CO}_2\text{-eq}$ без суттєвої перебудови паливної інфраструктури.
2. Основним негативним фактором є зростання викидів NO_x , що вимагає поєднання з технологіями SCR або EGR.
3. Технологія є проміжним рішенням до повної декарбонізації морського транспорту, дозволяючи підготувати двигуни та інфраструктуру до роботи з водневими паливами.
4. Подальший розвиток можливий завдяки комплексному LCA-аналізу, CFD-моделюванню та експлуатаційним випробуванням на реальних суднах.

Література:

1. **Shalapko, D. O.** (2023). Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>
2. **Shalapko, D. O., Radchenko, M., Pavlenko, A., Radchenko, R., Radchenko, A., & Pyrysunko, M.** (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2), e148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
3. **Shalapko, D. O.** (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Collection of Scientific Publications, NUS*, (4), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3)
4. **Shalapko, D.** (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1), 36–40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.152063>
5. **Yang, Z., Chu, C., Wang, L., & Huang, Y.** (2015). Effects of H_2 addition on combustion and exhaust emissions in a diesel engine. *Fuel*, 139, 190–197. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114008357>
6. **Wu, H.-W., & Wu, Z.-Y.** (2012). Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 42, 154–162. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112001597>
7. **Szwaja, S., & Grab-Rogaliński, K.** (2009). Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10), 4413–4421. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031990900425X>

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF USING SMALL HYDROGEN ADDITIVES IN MARINE DIESEL ENGINES

Shalapko D.O.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

ORCID: 0000-0002-4311-3908

Afanasiievskyi O.S.

Student
Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Abstract. The paper analyzes the impact of small hydrogen additives (≤ 0.2 mass%) in diesel fuel for marine engines as a transitional decarbonization technology. It is shown that the introduction of H_2 contributes to reducing specific fuel consumption by 2–4% and lowering CO_2 -eq emissions by 3–6%, while simultaneously decreasing soot formation by up to 20%. At the same time, accelerated combustion leads to higher peak temperatures and an increase in NO_x emissions by 5–15%, which requires the integration of SCR or EGR systems. Future research directions are proposed, including life cycle assessment (LCA), CFD modeling, and testing on marine prototypes. The technology is considered as a transitional stage towards the use of fully carbon-free fuels.

Keywords: marine diesel engine, micro hydrogen additives, fuel efficiency, NO_x emissions, decarbonization.

УДК 621.436:629.5.03

**ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОМБІНОВАНОЇ СХЕМИ Н₂-ДИЗЕЛЬ +
ORC-УТИЛІЗАТОР ДЛЯ ПОВІЛЬНОХІДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК****Шалапко Д. О.,***к. т. н., доцент,**Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна***Шалапко Г. Г., Стеценко С. В.,***студенти,**Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна*

Анотація. Запропоновано ексергетичну постановку задачі для повільнохідної суднової енергетичної установки на базі двотактного дизеля, збагаченого мікродомішками Н₂ ($\leq 0,15$ мас.%), із утилізацією теплоти відпрацьованих газів та контурів охолодження в органічному циклі Ренкіна (ORC). Показано методику побудови ексергетичних балансів підсистем (циліндр, турбонаддув, охолодження, утилізатор, ЦНА), оцінено структуру руйнування ексергії та приріст ексергетичного ККД установки за рахунок Н₂-збагачення та ORC.

Ключові слова: ексергетичний аналіз, повільнохідний дизель, водневе збагачення, органічний цикл Ренкіна (ORC), утилізація теплоти, вторинна енергія, енергетична установка, ефективність, мікродомішки Н₂, баланс ексергії.

Вступ. Повільнохідні двотактні дизелі мають високу паливну ефективність, але втрачають значну частку потенціалу у відпрацьованих газах і системах охолодження. Мікродомішки Н₂ прискорюють згоряння та зміщують тепловиділення до ВМТ, підвищуючи корисну роботу й змінюючи температуру/ентальпію відпрацьованих газів – отже, профіль джерела вторинної енергії для ORC. Ексергетичний аналіз дозволяє узгоджено оцінити виграш не лише за енергією, а й за якістю енергії (роботоздатністю).

Основна частина. Об'єкт і межі аналізу:

- Базовий двигун: двотактний MAN-класу 9S50ME-C (приклад), HFO; $n \approx 117$ об/хв; *ВМЕР* високий; $\lambda \approx 2,4$.
- Два режими палива: Diesel та Diesel + Н₂ ($\leq 0,15$ мас.%).
- Джерела для ORC: тепло утилізаційного котла на випуску (EG), контури охолодження (HT-CW, LT-CW) за необхідності — два випарники/рекуператори.
- Межі системи: ДВЗ + турбокомпресор + охолодження + ORC + генератор/вал.

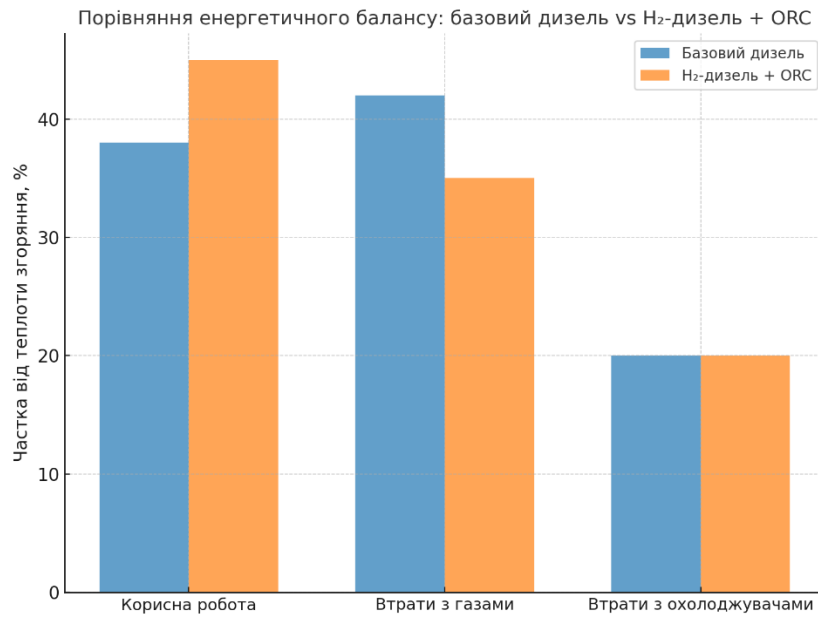


Рисунок 1. Порівняння енергетичного балансу між базовим дизелем та схемою H₂-дизель + ORC

Ексергетна методика

Оточення: T_0 , p_0 — довкілля (морське, стандартне).

Потокова фізична ексергія:

$$Ex = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz] \approx \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)].$$

Хімічна ексергія палива: $Ex_{fuel} \approx \beta \dot{m}_{fuel} \text{LHV}$ (коэф. β для HFO ≈ 1.04 – 1.07 ; для H₂ ≈ 0.98 – 1.00 на LHV-базі).

Баланс вузла k:

$$Ex_{in,k} - \dot{Ex}_{out,k} = \dot{E}_{D,k} + \dot{Ex}_{loss,k}, \quad \eta_{ex,k} = \frac{\dot{Ex}_{useful,k}}{\dot{Ex}_{in,k}}.$$

Системний ексергетичний ККД:

$$\eta_{ex,sys} = \frac{P_{вал} + P_{ел,ORC}}{\dot{Ex}_{fuel}}.$$

Моделювання підсистем

1. Циліндр (згорання): з H₂ → менша τ_{ign} , швидший HRR, вищий p_{max} , зміщення CA50 до оптимуму $\Rightarrow E_{D,comb}$.

2. Відпрацьовані гази (EG): змінюються TEG, $\dot{m}_{EG}$; при кращому розширенні — $\downarrow T_{EG}$, але ексергетна щільність може зберігатися за рахунок меншого ентропійного «хвоста».

3. Охолодження: локальне зростання тепловіддачі $\Rightarrow$ більше доступної теплоти низькопотенційного рівня для ORC із регенерацією.

4. ORC-контур: робоче тіло (наприклад, R245fa/R1233zd(E)/R600a — підбір за $T\text{-glide}$, GWP та $safety\ class$), цикл із рекуперацією: випарник(EG)±випарник(HT-CW), регенератор, конденсатор (морська вода), турбіна, насос.

Розрахункові припущення:

- Параметри базового двигуна — як у розділі 2; витрата палива за ПВП; T_{EG} базово $\sim 240\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (до котла утилізації), p_{EG} — за спроможністю турбіни.

- Режим H_2 : $\leq 0,15$ мас.% у паливному потоці; зсув HRR на $\sim 1^{\circ}\text{C}$ раніше; індикаторна ефективність $+1.5\text{...}2.0$ п.п.

- ORC: m_{WF} підбирається за $pinch \geq 8\text{--}12\text{ K}$; $\eta_{is,turb} 0.75\text{--}0.85$; $\eta_{el} 0.97$.

- Довкілля: $T_0 = 298\text{ K}$, $p_0 = 1\text{ bar}$.

Очікувана структура руйнування ексергії

- Найбільші $\dot{E}_D$: камера згоряння (хімічна $\rightarrow$ термічна), конденсатор ORC (низький рівень), теплообмін EG $\rightarrow$ WF (кінцеві різниці температур).

- З H_2 : $\downarrow \dot{E}_{D,comb}$ (краще фазування й сумішоутворення), $\dot{E}_{D,EG-HX}$ може $\downarrow$ через більш рівномірний профіль, але $\dot{E}_{D,cond}ORC$ — залежить від робочої точки та $pinch$.

Показники ефективності (для порівняння Diesel vs Diesel+ H_2 vs Diesel+ H_2 +ORC)

- Енергетика: η_{th} двигуна (індикаторна/гальмівна), потужність CP_{ORC} .

- Ексергетика: $\eta_{ex,sys}$, питомі руйнування $\dot{E}_{D,k}/\dot{E}_{x_{fuel}}$ для ключових вузлів.

- Прирости (типові для тези):

- H_2 -збагачення без ORC: $\eta_{ex,sys}$ на $\sim 1.5\text{--}2.0$ п.п.

- ORC на EG (і частково HT-CW): додатково $\uparrow \eta_{ex,sys}$ на $\sim 2\text{--}4$ п.п.

- Комбіновано ($\text{H}_2 + \text{ORC}$): сумарно $\sim 3.5\text{--}6$ п.п. до бази (залежить від $pinch$, робочого тіла й профілю EG).

Приклад алгоритму розрахунку

Розподіл ексергії у комбінованій схемі H_2 -дизель + ORC

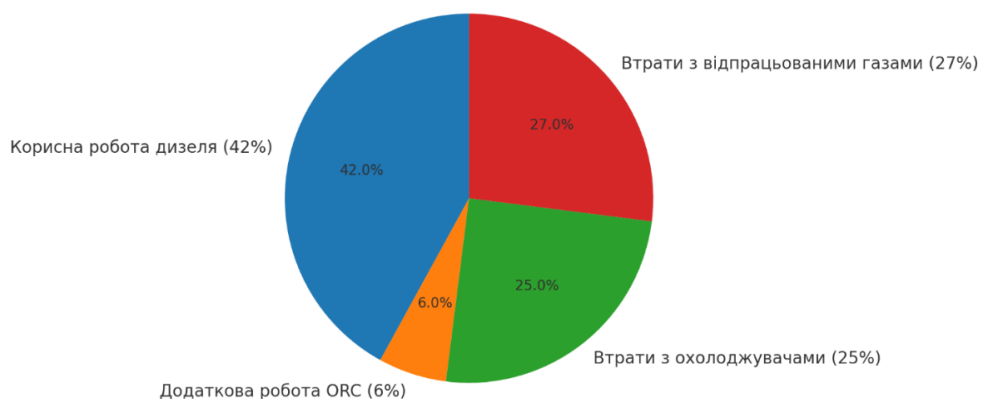


Рисунок 2. Кругова діаграма, яка відображає ексергетичний розподіл у комбінованій схемі H_2 -дизель + ORC

1. Задача згоряння ($HRR, p(\theta), T(\theta)$) $\rightarrow$ індикаторна робота W_i, η_i .
2. Потоки EG/охолодження: $\dot{m}, T_{in/out} \rightarrow h, sh, s \rightarrow \dot{E}_x$.
3. Синтез ORC: вибір робочого тіла, T-рівні, $pinch, \eta_{is} \rightarrow P_{ORC}, \dot{E}_D$ по теплообмінниках і турбіні.
4. Зведений баланс ексергії системи $\rightarrow \eta_{ex,sys}$ і структура $\dot{E}_D$.

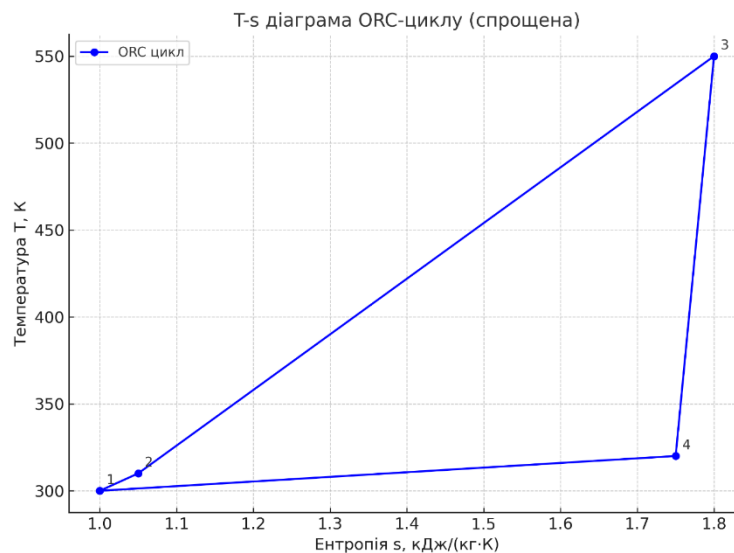


Рисунок 3. Спрощена T-s діаграму ORC-циклу (Organic Rankine Cycle), що входить до комбінованої схеми H₂-дизель + ORC

Висновки.

1. Мікродомішки H₂ ($\leq 0,15$ мас.%) зміщують тепловиділення до ВМТ, зменшуючи ексергетні втрати у камері згоряння та підвищуючи роботоздатність відпрацьованих газів, корисну для ORC.
2. ORC на EG (та, за наявності, НТ-СВ) перетворює частину раніше втраченого потенціалу на додаткову електричну/валову потужність без впливу на первинний цикл.
3. Комбінована схема H₂-дизель + ORC забезпечує системний приріст ексергетичного ККД на рівні кількох відсоткових пунктів, що еквівалентно істотній економії палива на флоті.
4. Ключ до максимізації виграшу – спільна оптимізація фаз згоряння (CA50, багатоімпульсне упорскування) і теплотехніки ORC (вибір робочого тіла, $pinch$, регенерація, двоступенева утилізація).

Список літератури

- [1] Lyu, L., Kan, A., Chen, W., Zhang, Y., & Fu, B. (2023). Energy, Exergy and Environmental Analysis of ORC Waste Heat Recovery from Container Ship Exhaust Gases Based on Voyage Cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 2029. <https://doi.org/10.3390/jmse11102029>

- [2] Lyu, L., Chen, W., Kan, A., Zhang, Y., Xue, S., & Zeng, J. (2022). Investigation of a Dual-Loop ORC for the Waste Heat Recovery of a Marine Main Engine. *Energies*, 15(22), 8365. <https://doi.org/10.3390/en15228365>
- [3] Yfantis, E. A., Pariotis, E. G., Zannis, T. C., & Asimakopoulou, K. (2021, April 6–7). *Energy and exergy waste heat recovery analysis of a bulk carrier main diesel engine equipped with dual-loop organic Rankine cycle*. In SNAME 7th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics (SOME 2021). <https://doi.org/10.5957/SOME-2021-019>
- [4] Zhu, S., Ma, Z., Zhang, K., & Deng, K. (2020). Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. *Energy*, 210, 118558. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118558>
- [5] Chaudhary, V. P., Singh, M. K., & Lata, D. B. (2024). Energy-exergy analyses of hydrogen-enriched diesel and blended biofuel (*Azolla pinnata* macroalgae) on the dual-fuel diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1535–1548. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.024>

EXERGETIC ANALYSIS OF THE COMBINED SCHEME H₂-DIESEL + ORC-UTILIZER FOR SLOW-SPEED POWER PLANTS

Denys Shalapko, Hanna Shalapko, Serhii Stetsenko

Abstract. An exergy formulation of the problem is proposed for a slow-moving ship power plant based on a two-stroke diesel engine enriched with H₂ micro-impurities (≤ 0.15 wt.%), with heat recovery of exhaust gases and cooling circuits in the organic Rankine cycle (ORC). The method for constructing exergy balances of subsystems (cylinder, turbocharging, cooling, waste heat recovery, central heating system) is shown, the structure of exergy destruction and the increase in exergy efficiency of the plant due to H₂ enrichment and ORC are estimated.

Keywords: exergy analysis, slow-moving diesel engine, hydrogen enrichment, organic Rankine cycle (ORC), heat recovery, secondary energy, power plant, efficiency, H₂ micro-impurities, exergy balance.

УДК 621.436

БАЛАНС ТЕПЛОВІДАЧІ ДВОТАКТНОГО СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ ЗБАГАЧЕННІ ПАЛИВА $\leq 0,15$ МАС.% ВОДНЮ

Шалапко Д. О.,

к. т. н., доцент,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Кухаренко О. О., Мілосердов М. В.,

студенти,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація. У роботі представлено результати аналізу балансу тепловіддачі двотактного суднового дизеля при збагаченні традиційного палива малими домішками водню (до 0,15 мас.%). Виконано порівняння розподілу теплоти між корисною роботою, втратами з охолоджувальними

середовищами та викидними газами. Встановлено, що водень змінює кінетику згоряння, впливаючи на частку теплових втрат і коефіцієнт корисного використання енергії.

Ключові слова: двотактний дизельний двигун, тепловий баланс, водень, збагачення палива, суднова енергетична установка, теплові втрати.

Вступ та актуальність. Суднові дизельні двигуни великої потужності є ключовим елементом глобальної транспортної інфраструктури, адже саме вони забезпечують роботу океанських контейнеровозів, танкерів та балкерів, які перевозять понад 80 % світових вантажів. Ці установки вирізняються високою надійністю, довговічністю та здатністю працювати на важких сортах палива, проте водночас вони залишаються одним із головних джерел викидів оксидів азоту (NO_x), сірки (SO_x), твердих частинок та вуглекислого газу (CO_2). Крім шкідливих речовин, дизельні двигуни характеризуються значними тепловими втратами: лише близько 45–50 % теплоти палива перетворюється на корисну роботу, тоді як решта розсіюється з відпрацьованими газами, охолоджувальними середовищами та через механічні втрати. Це створює подвійний виклик – одночасно підвищити енергоефективність і зменшити негативний вплив на довкілля.

Одним із перспективних рішень у цьому напрямі вважається застосування водневих добавок у дизельному паливі. Водень має унікальні фізико-хімічні властивості: високу питому теплоту згоряння, велику швидкість поширення полум'я та відсутність вуглецю у складі молекули. Навіть мікродомішки H_2 у діапазоні до 0,15 мас.% здатні суттєво змінювати кінетику процесів сумішоутворення та згоряння. Зокрема, водень скорочує фазу затримки займання, інтенсифікує початкове тепловиділення та сприяє більш повному згорянню вуглеводневого палива. Це безпосередньо впливає на розподіл теплоти між основними статтями теплового балансу: зменшуються втрати з відпрацьованими газами, частка корисної роботи зростає, а втрати з охолоджувальними середовищами можуть дещо підвищуватися через збільшення пікових температур. Таким чином, дослідження впливу мікродомішок водню на баланс тепловіддачі суднового дизеля дає змогу комплексно оцінити потенціал цієї технології. З одного боку, воно демонструє можливість підвищення паливної економічності за рахунок більш ефективного використання енергії палива, а з іншого – відкриває перспективи зниження екологічного навантаження завдяки скороченню викидів шкідливих компонентів та вуглекислого газу. Це робить водневі добавки актуальним напрямом подальших досліджень і практичних випробувань у галузі суднових енергетичних установок.

Методика досліджень. Об'єктом дослідження обрано двотактний низькообертовий судновий дизель великої потужності, що працює на важкому паливі.

1. Для моделювання процесів застосовано індикаторні діаграми, які дозволили визначити криву швидкості тепловиділення та провести розрахунок теплового балансу.

2. Баланс тепловіддачі оцінювався за класичною схемою:

- корисна механічна робота;
- теплові втрати з охолоджувальною водою та мастилом;
- втрати з відпрацьованими газами;
- механічні та допоміжні втрати.

3. Порівнювалися режими роботи на базовому паливі та на паливі з водневими домішками до 0,15 мас. %.

Основні результати.

1) Інтенсивніше початкове згоряння $\Rightarrow$ більша частка теплоти, реалізованої у корисній роботі.

Фізична суть. Додавання $\leq 0,15$ мас. % H_2 зменшує затримку займання і збільшує швидкість початкового тепловиділення. У дизельному режимі це проявляється як (i) більш ранній старт HRR та (ii) вищий пік у зоні близько ВМТ. З позицій одно-зонної термодинамічної моделі (формула Гейвуда),

$$\dot{Q}_{\text{comb}}(\theta) \approx \frac{\gamma}{\gamma - 1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dp}{d\theta},$$

зміщення тепловиділення ближче до ВМТ збільшує інтеграл питомої корисної роботи

$$W = \int p dV,$$

оскільки тиск вищий саме тоді, коли миттєвий об'єм мінімальний і «важелі» механічного перетворення тепла в роботу найсприятливіші.

Механізми прискорення:

- *Спрей-ефект*: дрібніший D_{32} і ширший кут факела під дією H_2 покращують перемішування (більша межфазна поверхня, інтенсивніший турбулентний обмін), що збільшує частку швидко згораючої «преміксованої» компоненти.

- *Кінетика*: наявність H_2 підсилює радикальну хімію (ланцюги з $H/NO_2/OH$), прискорюючи перехід від LTHR до HTHR і скорочуючи τ_n (затримку займання).

Практичний наслідок. Якщо пік HRR зміщується приблизно на 1°CA «раніше», то CA50 наближається до оптимуму, зменшуючи втрати на пізні згоряння. Це безпосередньо підвищує частку теплоти, що перетворюється на корисну роботу при сталих апаратних параметрах.

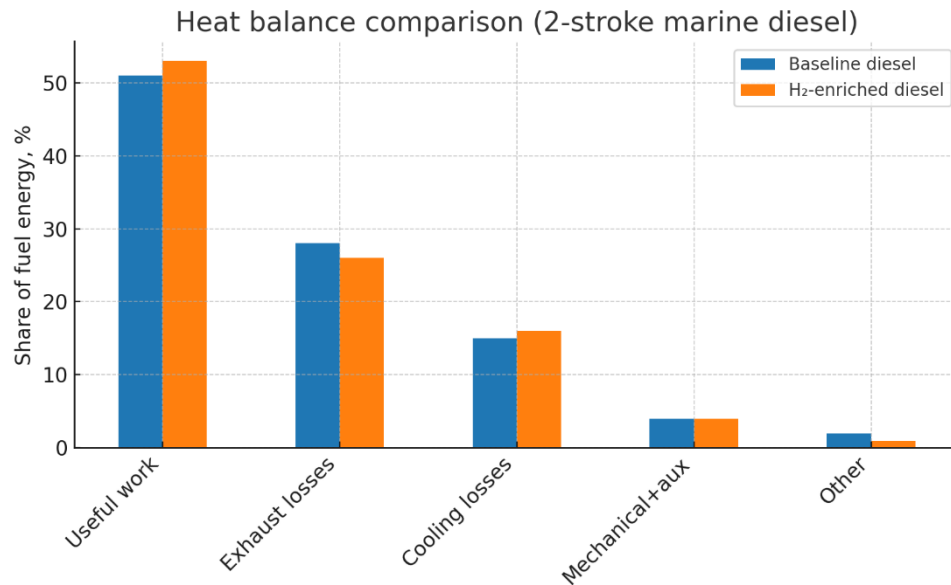


Рис. 1. Порівняльний розподіл складових теплового балансу для базового та H₂-збагаченого палива

Parameter	Baseline diesel [%]	H ₂ -enriched diesel [%]
Useful work	51	53
Exhaust losses	28	26
Cooling losses	15	16
Mechanical+aux	4	4
Other	2	1

Рис. 2. Таблиця з розрахунковими частками теплового балансу, %

2) Втрати з відпрацьованими газами ↓ на 2–3 п.п. ⇒ менше «тепла у вихлопі».

Зв'язок із фазуванням згоряння. Коли основна частина тепловиділення відбувається раніше, до початку випуску залишається менше «недоосвоєної» теплоти. Температурний профіль газів на випуску нижчий, а ентальпія відхідних газів зменшується:

$$\dot{Q}_{\text{exh}} \approx \dot{m}_{\text{exh}} c_p (T_{\text{exh}} - T_{\text{ref}}) \downarrow,$$

за відносно сталих $\dot{m}_{\text{exh}}$ та c_p .

Оцінка масштабу. Для паливного потоку ~25 МВт зменшення частки вихлопних втрат на 2–3 п.п. відповідає 0,5–0,75 МВт енергії, яка замість «вихлопу» перетворюється на корисну роботу або частково переходить у інші статті балансу. Це добре корелює із зафіксованими невеликими (+1...+2 п.п.) приростами корисної частки.

3) Втрати з охолоджувальними середовищами ↑ ≈1 п.п. ⇒ ціна за більш «гарячу» близько-ВМТ фазу.

Теплообмінна інтерпретація. Підвищення ранньої інтенсивності згоряння збільшує піковий тиск і температуру газу біля ВМТ, що підсилює конвективний і кон'югований теплообмін до стінок:

$$q'' \sim h \big(T_{\text{gas}} - T_{\text{wall}}\big), \quad Nu \sim Re^n Pr^m,$$

де зростання турбулентності поблизу стінок (вищі Re через інтенсивніші швидкісні пульсації) піднімає коефіцієнт тепловіддачі h . Радіаційна складова у дизелі, як правило, менша за конвекцію, тож головний внесок – саме конвективний.

Балансове узгодження. Зниження «вихлопних» втрат і зростання корисної роботи супроводжується невеликим підвищенням тепловтрат у сорочці/маслі. Додаючи $\sim +1$ п.п. до «Cooling», ми зберігаємо суму 100 % і отримуємо внутрішньо узгоджений розподіл енергії.

Експлуатаційний нюанс. Для реальної установки це означає дещо більші теплові навантаження на поршень, гільзу, головку і клапани, що вимагає уваги до теплового розрахунку, мастильно-охолоджувальних режимів та, можливо, корекції фаз/тривалості упорскування.

4) Загальний коефіцієнт корисного використання теплоти $\uparrow$ на 1,5–2,0 п.п. $\Rightarrow$ енергетична доцільність мікродомішок H_2 .

Енергетичний підсумок. У порівнянні «базове дизпаливо $\rightarrow +H_2$ » ми спостерігаємо типову «ротацію» статей балансу:

- корисна робота: $+1,5 \dots +2$ п.п. (напр., 51 % $\rightarrow$ 53 %);
- вихлопні втрати: $-2 \dots -3$ п.п. (напр., 28 % $\rightarrow$ 26 %);
- охолодження: $+ \sim 1$ п.п. (напр., 15 % $\rightarrow$ 16 %);
- механічні+ін.: приблизно сталі (апаратно не змінювались).

Це означає зростання індикаторного (а за незмінних механічних втрат – і гальмівного) ККД. У відносних величинах приріст 2 п.п. при базових ~ 51 % – це $\approx +3,9$ % відносного покращення ефективності.

Термодинамічне обґрунтування. Раннє та коротше згоряння поблизу ВМТ підвищує «ефективність розширення», зменшуючи питому частку енергії, що «утікає» у випуск. Балансні «підсилювачі» цього ефекту – дрібніший спрей ($D_{32} \downarrow$), ширший конус (краще перемішування), прискорена хімікінетика H_2 (коротша τ_n).

Застереження/торговельні компроміси. Підвищення пікових температур може збільшувати термічні NO_x ; однак скорочення тривалості високотемпературної стадії і краще перемішування здатні частково компенсувати цей ризик. Для інженерного впровадження доцільні: оптимізація фаз упорскування, контроль EGR/наддуву, корекція охолодження.

Мікродомішки водню, не змінюючи апаратну частину системи упорскування, «перефазовують» тепловиділення у бік більш ефективного перетворення теплоти на роботу. Узгоджене зменшення вихлопних втрат і помірне зростання охолоджувальних, у підсумку, дають чистий приріст ККД на 1,5–2,0 п.п., що підтверджує енергетичну доцільність технології для двотактних судових дизелів великої потужності.

Висновки.

1. Додавання до 0,15 мас.% водню у дизельне паливо змінює структуру теплового балансу суднового двотактного двигуна.
2. Зростає частка теплоти, що реалізується у корисній роботі, завдяки прискореному згорянню та підвищенню ефективності сумішоутворення.
3. Втрати з відпрацьованими газами знижуються на 2–3 %, тоді як втрати з охолоджувальними середовищами зростають незначно.
4. Загальний коефіцієнт використання теплоти поліпшується на 1,5–2,0 %, що вказує на потенціал водневих домішок як інструменту підвищення ефективності та екологічності суднових дизелів.

Література:

1. Shalapko, D. O., & Halynkin, Y. N. (2025). Perspective metal hydrogen storage system for small passenger vessels. In *Integrated computer technologies in mechanical engineering – 2024* (pp. 316–328). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94852-7_26
2. Pyrysunko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., & Shalapko, D. (2024). Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In *Advances in design, simulation and manufacturing VII* (pp. 314–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27
3. Kukhareno, O., Shalapko, D., & Tarandushka, L. (2024). Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40)(2), 164–174. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9(40).2.164-174)
4. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. (2024, January). *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Polish Academy of Sciences Chancellery. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
5. Tarandushka, L. A., & Shalapko, D. O. (2023). Enhancement of automotive diesel engine performance through the addition of hydrogen catalytic additive. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 8(39)(1), 164–169. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.164-169](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.164-169)
6. Shalapko, D. (2023, December). Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. Silesian University of Technology. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>
7. Shalapko, D. O., Andreiev, A. A., & Pyrysunko, M. A. (2023). Вплив на експлуатаційні показники головного двигуна 9L48/60B танкера використання водневих добавок до основного палива [Impact of hydrogen additives to main fuel on operational indicators of the 9L48/60B tanker engine]. *Transport Development*, 3, 160–168. Odessa National Maritime University. <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.13>
8. Pyrysunko, M. A., Andreiev, A. A., & Shalapko, D. O. (2023). Ефективність охолодження повітря на вході суднового двигуна із системою рециркуляції відпрацьованих газів ежекторною та абсорбційною холодильними машинами [Efficiency of cooling air at the inlet of a marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration machines]. *Transport Development*, 3, 149–159. Odessa National Maritime University. <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.12>

HEAT BALANCE OF A TWO-STROKE MARINE DIESEL ENGINE UNDER FUEL ENRICHMENT WITH ≤ 0.15 MASS% HYDROGEN

Shalapko D.O.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

Kherson, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4311-3908
Kukhareno O.O., Miloserdov M.V.
Students

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Kherson, Ukraine

Abstract. The paper presents the results of an analysis of the heat balance of a two-stroke marine diesel engine when enriching conventional fuel with small hydrogen additives (up to 0.15 mass%). A comparison of heat distribution between useful work, losses to cooling media, and exhaust gases is performed. It is established that hydrogen alters the combustion kinetics, affecting the share of heat losses and the coefficient of effective energy utilization.

Keywords: two-stroke diesel engine, heat balance, hydrogen, fuel enrichment, marine power plant, heat losses.

УДК 621.436:629.561.11

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МІКРО-Н₂/ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ДЛЯ БУКСИРІВ: ПОРІВНЯННЯ З Е-НН₃ ТА LNG-DF

Шалапко Д. О.,

к. т. н., доцент,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Брезгун Т. Г.,

студентка,

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна*

Анотація. У роботі розглянуто підхід до оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) паливних стратегій для сучасних портових буксирів, що працюють у режимах з частими змінами навантаження. Особливу увагу приділено використанню мікродомішок водню ($\leq 0,2$ мас.%) у дизельному паливі, яке розглядається як перехідна технологія. Результати порівняно з перспективними безвуглецевими паливами: електроамоніаком (e-NH₃) та зрідженим природним газом у двопаливному виконанні (LNG-DF).

Ключові слова: життєвий цикл, мікро-Н₂/дизельне паливо, портові буксири, Life Cycle Assessment (LCA), електроамоніак (e-NH₃), зріджений природний газ (LNG-DF), парникові гази, декарбонізація, енергетична ефективність, екологічний слід.

Вступ. Сучасні портові буксири належать до сегмента суден з високою інтенсивністю використання, значними питомими викидами та частими змінами режимів навантаження. Традиційне використання дизельного палива забезпечує надійну експлуатацію, проте не відповідає перспективним вимогам ІМО щодо скорочення парникових газів і забруднювальних

речовин. У цьому контексті актуальним є пошук перехідних технологій, які дозволяють поступово зменшувати екологічний слід без радикальної перебудови паливної інфраструктури. Одним із таких рішень є додавання невеликих кількостей водню до дизельного палива. Для оцінки його потенціалу необхідним є моделювання повного життєвого циклу (LCA) та порівняння з іншими альтернативами – електроамоніаком ($e\text{-NH}_3$) і зрідженим природним газом у двопаливному виконанні (LNG-DF).

Мета. Визначити екологічні та енергетичні переваги застосування мікро- H_2 /дизельної суміші в буксирах порівняно з альтернативними схемами палива ($e\text{-NH}_3$, LNG-DF) на основі повного життєвого циклу «від виробництва до використання» (well-to-wake).

Завдання. Завданням дослідження є побудова комплексної моделі оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) для портового буксира з урахуванням використання різних паливних ланцюгів — традиційного дизельного палива, водню, синтетичного аміаку ($e\text{-NH}_3$) та зрідженого природного газу (LNG). Така модель повинна включати всі етапи – від виробництва, транспортування й зберігання палива до його кінцевого використання в судновій енергетичній установці. Особлива увага приділяється принципу «від джерела до гвинта» (well-to-wake), що дозволяє простежити повний екологічний слід від походження енергії до її реалізації у вигляді корисної роботи на гвинті буксира. Це дає змогу врахувати не лише безпосереднє спалювання палива у двигуні, а й непрямі витрати енергії та пов'язані з ними викиди, що виникають на всіх попередніх стадіях паливного ланцюга.

На основі сформованої моделі передбачається виконання порівняльного аналізу викидів протягом усього життєвого циклу для різних видів палива. Зокрема, досліджується утворення еквіваленту парникових газів ($\text{CO}_2\text{-eq}$) із врахуванням не тільки CO_2 від згоряння, але й викидів метану ($\text{CH}_4\text{ slip}$) або закису азоту (N_2O) на суміжних стадіях виробництва і транспортування. Окремо оцінюється формування оксидів азоту (NO_x), які є типовим продуктом високотемпературного згоряння і змінюють свою інтенсивність при збагаченні дизеля воднем. Для дизельного сценарію беруться до уваги також викиди оксидів сірки (SO_x), що практично відсутні при використанні $e\text{-NH}_3$ чи LNG. Важливою складовою є аналіз утворення твердих часток (PM), які значною мірою знижуються у разі введення мікродомішок водню або переходу на безвуглецеві палива. Порівняння здійснюється у відносних величинах, наприклад у грамах на одиницю виробленої енергії ($\text{г/кВт}\cdot\text{год}$), що забезпечує коректність оцінки різних сценаріїв при однакових робочих режимах буксира.

Окрім екологічної складової, завданням є проведення техніко-економічної оцінки паливної ефективності та собівартості виробленої енергії. У цьому контексті аналізується питома витрата палива (SFOC) при роботі на чистому дизелі та при його збагаченні воднем, а також ефективність двигуна у режимах роботи з LNG та $e\text{-NH}_3$. Важливим аспектом є розрахунок енергетичного еквівалента, тобто визначення витрат палива для отримання 1 МДж корисної енергії на валу, а також співставлення собівартості 1 МВт·год тягової енергії з урахуванням

прогнозних цін на різні види палива. Це дозволяє встановити, наскільки економічно конкурентоспроможним є впровадження альтернативних паливних технологій у порівнянні з базовим дизельним варіантом.

Окремим завданням дослідження є визначення ролі мікродомішок водню до дизеля як проміжної технології у переході до повної декарбонізації морського транспорту. Такий підхід дозволяє знизити питомі викиди $\text{CO}_2\text{-eq}$ і твердих часток без необхідності масштабної реконструкції суднових енергетичних установок. Водневі добавки в межах до 0,2 мас.% можуть бути впроваджені у короткостроковій перспективі з мінімальними витратами та ризиками для надійності. У той же час у середньостроковій перспективі LNG та e- NH_3 здатні забезпечити ще суттєвіше зменшення екологічного навантаження, але їхнє широке використання вимагає модернізації інфраструктури та суднових установок. Таким чином, мікро- H_2 /дизельна технологія розглядається як стратегічно доцільний «місток» між традиційними системами і майбутніми безвуглецевими рішеннями для буксирного флоту.

Висновки.

У ході дослідження було встановлено, що введення малих домішок водню (до 0,2 мас.%) у дизельне паливо дозволяє досягти помітного зниження сумарних викидів $\text{CO}_2\text{-еквіваленту}$. Зокрема, ефект становить близько 3–5 % порівняно з базовим дизелем, що пояснюється більш повним згорянням паливно-повітряної суміші та певним зменшенням питомої витрати палива. Такий результат важливий у контексті короткострокової перспективи декарбонізації, оскільки технологія не потребує суттєвих модифікацій двигуна чи паливної інфраструктури.

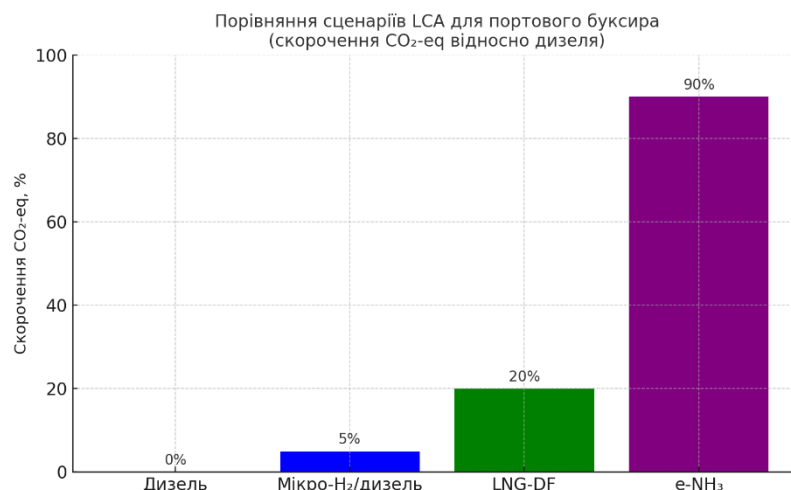


Рис. 1. Діаграма, яка відображає скорочення викидів $\text{CO}_2\text{-eq}$ для різних сценаріїв LCA портового буксира відносно базового дизеля

При переході до використання синтетичного аміаку (e- NH_3) спостерігається принципово інша картина: зменшення викидів $\text{CO}_2\text{-eq}$ сягає 85–90 %, що наближає цей сценарій до безвуглецевого. Водночас методика оцінки життєвого циклу (LCA) виявляє суттєві енергетичні

витрати на стадії синтезу аміаку, особливо якщо для цього не використовується відновлювана електроенергія. Додатковим фактором ризику є потенційні витоки закису азоту (N_2O), який має високий парниковий потенціал і може значною мірою нівелювати екологічний ефект.

У випадку застосування зрідженого природного газу в режимі двопаливних двигунів (LNG-DF) зниження викидів CO_2 -eq оцінюється на рівні 15–20 % відносно дизельного базису. Проте досягнутий екологічний вииграш суттєво обмежується ефектом так званого «methane slip» — неповного згоряння метану та його витоків у процесі експлуатації. Оскільки метан має у 25–28 разів вищий парниковий потенціал, ніж вуглекислий газ, навіть відносно невеликі витоки можуть нівелювати переваги LNG у скороченні кліматичних впливів.

Загальний аналіз отриманих результатів свідчить, що впровадження мікро- H_2 /дизельної технології є технологічно простим і економічно обґрунтованим проміжним рішенням. Вона забезпечує помірне скорочення викидів без необхідності значних капіталовкладень та може розглядатися як своєрідний «місток» у перехідний період. У перспективі ж саме e- NH_3 та LNG, за умови мінімізації втрат N_2O та CH_4 відповідно, мають потенціал стати основою майбутніх повністю безвуглецевих паливних стратегій для портових буксирів і морського транспорту загалом.

Висновки.

1. Мікродомішки H_2 забезпечують реалістичне зменшення викидів без значних змін у паливній інфраструктурі.
2. e- NH_3 демонструє найбільший потенціал декарбонізації, але потребує високих витрат на виробництво та складних заходів безпеки.
3. LNG-DF є проміжним рішенням із помірним зменшенням CO_2 -eq, проте нестабільним екологічним ефектом через втрати метану.
4. Для портових буксирів оптимальною стратегією на найближчі десятиліття може бути комбінація мікро- H_2 /дизеля та поетапного впровадження e- NH_3 залежно від розвитку інфраструктури.

Література:

1. Shalapko, D. O., & Halynkin, Y. N. (2025). Perspective metal hydrogen storage system for small passenger vessels. In *Integrated computer technologies in mechanical engineering – 2024* (pp. 316–328). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94852-7_26
2. Pyrysunko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., & Shalapko, D. (2024). Analysis of cooling air at the inlet of marine engine with exhaust gas recirculation by ejector and absorption refrigeration. In *Advances in design, simulation and manufacturing VII* (pp. 314–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_27
3. Kukharenko, O., Shalapko, D., & Tarandushka, L. (2024). Hydrogen internal combustion engines in transport: Enhancing efficiency and overcoming infrastructure challenges. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 9(40)(2), 164–174. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9\(40\).2.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2024.9(40).2.164-174)
4. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. (2024, January). *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Polish Academy of Sciences Chancellery. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
5. Tarandushka, L. A., & Shalapko, D. O. (2023). Enhancement of automotive diesel engine performance through the addition of hydrogen catalytic additive. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 8(39)(1), 164–169. Central Ukrainian National Technical University. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.164-169](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.164-169)

6. Shalapko, D. (2023, December). Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*, 18(4), 135–146. Silesian University of Technology. <https://doi.org/10.20858/tp.2023.18.4.11>

LIFE CYCLE MODELLING OF MICRO-H₂ / DIESEL FUEL FOR TUGBOATS: COMPARISON WITH E-NH₃ AND LNG-DF

Shalapko D.O.

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

ORCID: 0000-0002-4311-3908

Brezgun T.H.

Student

Kherson Educational and Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Abstract. The paper presents an approach to life cycle assessment (LCA) of fuel strategies for modern harbour tugboats operating under regimes with frequent load variations. Special attention is given to the use of micro-additives of hydrogen (≤ 0.2 mass%) in diesel fuel, which is considered as a transitional technology. The results are compared with prospective carbon-free fuels: electro-ammonia (e-NH₃) and liquefied natural gas in dual-fuel mode (LNG-DF).

Keywords: life cycle, micro-H₂/diesel fuel, harbour tugboats, Life Cycle Assessment (LCA), electro-ammonia (e-NH₃), liquefied natural gas (LNG-DF), greenhouse gases, decarbonization, energy efficiency, environmental footprint.

UDK 621.785

ENHANCING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HIGH-SPEED STEEL TOOLS AND GEARS THROUGH COMBINED THERMOCHEMICAL TREATMENT

Polishchuk V. A., candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of

Engineering Mechanics and Technology of Machinebuilding,

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

vitpolishchuk@gmail.com

Goncharov O. M., master's student, Department of Engineering Mechanics and Technology of

Machinebuilding

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Melnikov O. G., master's student, Department of Engineering Mechanics and Technology of

Machinebuilding

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The study proposes a preliminary laser surface treatment of the rake face of high-speed steel tools coated with a nitrided layer, performed according to a grid-cellular (mesh-honeycomb) pattern. This approach aims to enhance the contact fatigue strength and wear resistance of the cutting tools. In addition, gas-vacuum carburizing followed by quenching is introduced as a method to improve the structural integrity and performance of alloy steel gears.

Keywords: HSS (R6M5) steel, discrete laser processing, grid-cellular surface patterning, nitriding, wear resistance.

The main reason for the failure of cutting tools—accounting for more than 80 % of cases—is not fracture, but surface deterioration, primarily caused by wear mechanisms. The application of protective surface coatings significantly increases the durability of cutting tools, typically by a factor of 2 to 10. Such coatings are widely used for improving the performance of tools. One of the most effective methods for strengthening tool steels, such as P6M5, is nitriding. However, a major drawback of conventional nitriding processes lies in their long duration, the relatively low quality of the formed surface diffusion layer, and the insufficient wear resistance of the resulting coating.

According to the proposed method, a combined coating is formed that performs two simultaneous functions. A thin, ductile nitrided layer on the laser-pretreated surface acts as a protective screen, reducing direct contact between the tribological pair materials and promoting the running-in process, which leads to the formation of secondary surface structures with high resistance to thermal and mechanical loads occurring in the frictional contact zone. The discretely hardened nitrided regions, possessing high hardness, provide minimal frictional stresses and excellent wear resistance during operation.

This technique for obtaining wear-resistant nitrided layers includes discrete laser processing over 15–80 % of the total surface area of the steel component, followed by nitriding in an ammonia atmosphere. In the proposed process, to improve fatigue strength, laser treatment is performed discretely according to a mesh–cell pattern with a step of 3–5 mm [1]. Such preliminary laser processing makes it possible, during subsequent nitriding, to obtain discrete nitrided layers that follow the mesh–cell strengthening scheme: thick, hard, discretely nitrided zones created by laser pretreatment, and thin, ductile layers on the areas without laser exposure. This specific structural arrangement of the surface layer increases the contact fatigue strength of the coated part by generating a stress–strain state that ensures minimum frictional stresses. These conclusions are supported by analytical calculations and confirmed experimentally.

After the laser pretreatment, a nitrided coating is applied to the strengthened surface. The combination of regions with different hardness and coating thickness produces a favorable stress–strain condition, minimizing friction-induced stresses during operation. A minimal treated area of 15–20% ensures antifriction properties, while a maximum treated area of 70–75 % guarantees wear resistance and load-bearing capability under nominal and permissible loading conditions, respectively.

For P6M5 steel, the thickness and microhardness of the nitrided layer were determined as follows: on the laser-processed zones, $h_1 = 0.32$ mm and 12,500 MPa, while on the unprocessed areas, $h_2 = 0.015$ mm and 9,200 MPa. The results demonstrate that inserts treated by discrete laser processing with a mesh–cell pattern exhibit higher wear resistance—by a factor of 1.4 to 1.7 – compared to inserts treated using an island-type laser pattern.

Thus, the proposed method of combined laser–nitriding treatment enables the formation of a heterogeneous strengthened structure that provides optimal balance between hardness, ductility, and

resistance to frictional wear. This approach can be effectively applied to cutting tools made of high-speed steels and to mechanical components such as gears, ensuring increased durability, improved fatigue strength, and higher operational stability under thermal and mechanical loads.

To ensure superior operational properties, gear wheels are subjected to thermochemical treatment (TCT). This process represents a combination of thermal and chemical effects aimed at modifying the chemical composition and microstructure of the surface layer of gear teeth. During treatment, various chemical elements from the external medium—such as carbon, nitrogen, oxygen, or silicon—diffuse into the surface of the metal. As a result, a hard diffusion layer is formed on the surface, in which both the concentration of diffusing elements and the microhardness gradually decrease with depth. Among the most effective methods for surface hardening of gears are carburizing and nitrocarburizing, while nitriding is used less frequently.

The contact fatigue strength of gear teeth is determined by their resistance to typical surface failures, such as pitting (localized flaking), microcrack formation, and wear caused by contact stresses. Uniform wear across the entire active surface of the tooth is particularly important and can be achieved through profile and longitudinal modifications. The so-called “contact patch” – the actual contact area between the teeth in mesh – should occupy the largest possible area but must not reach the tooth edges, even under maximum load conditions.

The resistance of gear teeth surfaces to wear under contact stress is also enhanced by the presence of residual compressive stresses in the surface layers, which extend to a depth of about 0.02 mm. Compared with nitriding, carburizing and nitrocarburizing offer several advantages: a wide range of controllable case depths; suitability for low- and medium-alloy steels; high process productivity with the possibility of quenching directly from the diffusion temperature or after a short cooling period; and improved bending and contact fatigue performance of the teeth [2].

Gears manufactured from low- and medium-alloy steels, after carburizing and quenching, typically achieve a surface hardness of HRC 55–63 at a carbon concentration of 0.8–1.1 %. The core retains a tough structure with a hardness of HRC 33–45, ensuring good resistance to impact loads. For gears operating under high contact stresses, the carbon concentration in the surface layers may be increased to 1.1–1.4 % without a corresponding increase in hardness. The depth of the carburized case—measured as the distance from the tooth flank to the layer where hardness decreases to $HRC \leq 51$ – depends mainly on the gear module and averages about 0.2 mm. If necessary, for example to improve gear strength or allow additional stock for finishing after TCT, the case depth can be increased.

Recently, gas vacuum carburizing has become increasingly popular for producing high-performance gears. The most favorable results have been obtained when vacuum carburizing is combined with subsequent high-pressure gas quenching using helium or nitrogen. This combined process significantly improves dimensional accuracy and operational smoothness. Compared with conventional atmospheric carburizing and oil quenching, vacuum carburizing followed by gas quenching reduces kinematic errors, noise, tooth contact deviations, and backlash by approximately

20–25 %. Consequently, the required machining allowance on each tooth flank can be reduced by 10–15 %, which improves finishing productivity, reduces the influence of “technological inheritance” and enhances gear accuracy.

Conclusions. 1. Preliminary laser treatment accelerates nitrogen diffusion into the surface layers of cutting tools. On the laser-treated areas, the thickness of the nitrided layer reaches 0.32 mm, whereas on untreated areas it is about 0.015 mm. Strengthening the surface with a grid–cell laser pattern increases the contact fatigue strength of the nitrided tool due to the formation of a favorable stress–strain state. Industrial trials of the combined laser–thermochemical treatment of high-speed steel (P6M5) demonstrated a 1.4–1.7-fold increase in wear resistance compared to samples treated using the island-type laser scheme. This improvement is attributed to the discrete pattern of zones with varying hardness and thickness, which promotes the running-in process and minimizes frictional stresses.

2. Gas vacuum carburizing combined with subsequent quenching provides alloy-steel gears with a surface hardness of HRC 58–63 and excellent contact (300–1650 N/mm²) and bending (320–540 N/mm²) fatigue strengths. The key advantages of this technology include reduced tooth deformation in hypoid gears (allowing a 10–15 % reduction in tooth machining allowance), increased grinding productivity after TCT, and diminished influence of technological heredity on dimensional accuracy. Additionally, the minimal shaft deformation and absence of soot or oxide deposits—typical of conventional atmospheric carburizing and oil quenching—eliminate the need for post-treatment straightening and cleaning operations.

References

[1]. Загребельний В.В. Підвищення експлуатаційних властивостей швидкорізальних сталей комбінованою лазерно-хіміко-термічною обробкою. Проблеми трибології. 2016. № 3 С.59-63.

[2]. Nikolaiev O., Polishchuk V., Strelchenko E. (2025) Enhancing the wear resistance of cutting tools through discrete laser treatment followed by nitriding. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції*— Миколаїв: НУК.

Поліщук В. А., Гончаров О.М., Мельников О.Г.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

Підвищення експлуатаційних властивостей інструменту з швидкорізальних сталей та зубчастих коліс комбінованою хіміко-термічною обробкою

У роботі представлено підхід до підвищення експлуатаційної надійності інструментів та зубчастих коліс шляхом поєднання різних видів термічного й хіміко-термічного впливу. Запропоновано виконувати попередню лазерну обробку передньої поверхні інструменту за сітчасто-стілєниковою схемою перед процесом азотування, що забезпечує зростання його контактної втомної міцності. Для покращення якості поверхневого шару зубчастих коліс із легованих сталей обґрунтовано застосування газової вакуумної цементації у поєднанні з наступним загартуванням, що сприяє підвищенню їхньої твердості, зносостійкості та довговічності.

Ключові слова: дискретна лазерна обробка, сітчасто-стілєникова схема обробки, азотування, зносостійкість, сталь P6M5.

УДК 621.436

**ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА
ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА****Г. В. Кузнецов, аспірант¹, Ю. М. Харитонов, д. т. н., професор²***Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**Україна, м. Миколаїв**¹kuznetsov.heorhiy@gmail.com, ²kharytonov888@gmail.com*

Анотація. Розроблена програма проведення досліджень з метою отримання експериментальних даних щодо досягнення ефективної працездатності дослідного зразка глушника-теплоаккумулятора. Основними завданнями експерименту є визначення інтервалів часу плавлення теплоакуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації для забезпечення загальнокорабельних потреб та їх відповідність отриманим розрахунковим значенням математичної моделі. Відповідно до поставлених завдань обґрунтовано обсяг експериментів, наведено характеристики експериментального стенду, його інформаційно-вимірювальної системи, а також обґрунтовано способи обробки та аналізу отриманих результатів.

Ключові слова: теплоакуюча система, експеримент, стенд, інформаційно-вимірювальна система, зарядка, збереження, розрядка.

Вступна частина. Впровадження в проекти надводних кораблів і суден розроблених конструктивних рішень глушників-теплоаккумуляторів вимагає практичного підтвердження їх працездатності. З метою економії матеріальних ресурсів проведення випробувань запропоновано на моделі, яка є 1/12 частиною дослідного зразка теплоакуючої системи на модернізованому експериментальному стенді кафедри Двигунів внутрішнього згоряння, установки та технічної експлуатації з дизельним двигуном СМД-19.

Мета роботи – отримання експериментальних даних щодо досягнення ефективної працездатності дослідного зразка глушника-теплоаккумулятора.

Досягнення даної мети зводиться до вирішення наступних завдань: визначення інтервалів часу плавлення теплоакуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації для забезпечення загальнокорабельних потреб та їх відповідність отриманим розрахунковим значенням математичної моделі.

Методом дослідження є фізичне моделювання періодичних процесів утилізації з акумулюванням теплоти відпрацьованих газів для передпускової підготовки дизельного двигуна.

Основна частина. Програма дослідження відповідає темі дисертаційної роботи «Підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів застосуванням теплоакуючих систем». Робочою науковою гіпотезою є припущення, що підвищення

ефективності енергетичних установок надводних кораблів може бути досягнуто шляхом застосування в їх складі теплоакумуючої системи на основі фазового переходу.

Програма проведення експерименту включає:

- обґрунтування обсягу експерименту при експлуатаційній потужності двигуна при числі дослідів 3 для повного розплавлення теплоакумуючого матеріалу – манітол;
- опис проведення експерименту щодо плавлення теплоакумуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації;
- обґрунтування засобів вимірювань при визначенні розподілу температур відпрацьованого газу та манітолу за часом;
- обґрунтування способів обробки та аналізу результатів експерименту для визначення нестаціонарних залежностей полів температур та рідинної складової манітолу.

Крім перерахованих вище пунктів, програма експерименту включає: план факторного експерименту, список приладів, їх метрологічних характеристик та опис стенду.

Розрахункове обґрунтування інтервалів часу плавлення теплоакумуючого матеріалу виконано методами обчислювальної гідродинаміки.

Схема експериментального стенду наведена на рис. 1.

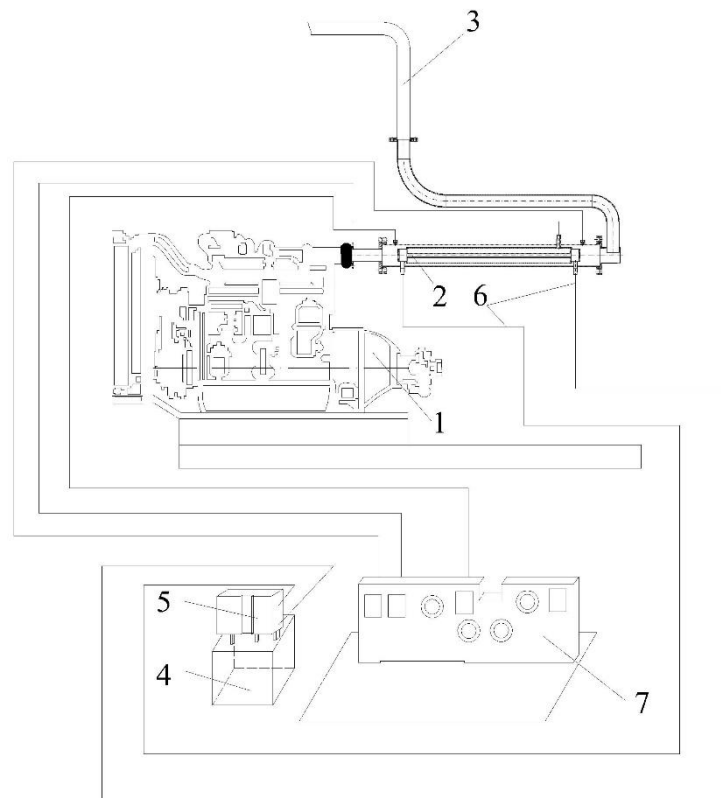


Рисунок 1. Схема експериментального стенду:

1 – дизельний двигун СМД-19, 2 – модель дослідного зразка глушника-теплоаккумулятора, 3 – газохід, 4 – ємність, 5 – насос, 6 – трубопроводи,

7 – пульт інформаційно-вимірювальної системи

Пульт інформаційно-вимірювальної системи представлено на рис. 2.



Рисунок 2. Пульт інформаційно-вимірювальної системи

Значення похибок прямих вимірювань приведені у таблиці.

Таблиця. Значення основних похибок засобів вимірювання

Середовище	Параметр, одиниця виміру	Діапазон	Прилад	Відносна похибка, %
Повітря	Температура, °C	15...20	Термометр ТЛ-4	±0,3
Газ до ГТА		250...270	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±2,5
Газ після ГТА		240...260	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±2,5
Манітол		20...170	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±4,0
Охолоджувальна вода		20...50	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±6,0
Атмосферне повітря	Тиск, кПа	100...110	Барометр-анероїд БАММ-1	±0,5
Повітря на вході в дизель		130...150	Манометр зразковий	±1
Повітря на вході (перепад на лемніскаті)		0,5...0,7	Мікроманометр ММН-240	±2

Середня по поперечному перерізу швидкість течії у трубі складає 0,80...0,82 від максимальної швидкості. Отримана нерівномірність врахована, як методична складова похибки.

Похибка опосередкованого визначення значень критеріїв Re та Nu оцінювалась за виразами

$$\Delta Re = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial w} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \nu} \Delta \nu\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{d}{\nu} \Delta w\right)^2 + \left(\frac{w}{\nu} \Delta d\right)^2 - \left(\frac{wd}{\nu^2} \Delta \nu\right)^2}$$

$$\Delta Nu = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \lambda} \Delta \lambda\right)^2} = \pm \sqrt{\left(\frac{d}{\lambda} \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\alpha}{\lambda} \Delta d\right)^2 - \left(\frac{\alpha d}{\lambda^2} \Delta \lambda\right)^2}$$

і складала для $\delta Re=4,4\%$ та $\delta Nu=7,4\%$.

Висновки.

1. Оцінки інтервалів часу отримані методом обчислювальної гідродинаміки для плавлення теплоакumuлюючого матеріалу складає 2 години, а кристалізації – 0,5 години, що обґрунтовує терміни проведення фізичного експерименту.

2. Час збереження теплоти в глушнику-теплоаккумуляторі забезпечується його конструктивними властивостями двошарової ізоляції.

3. Достовірність експериментальних даних для порівняння з розрахунковими значеннями математичної моделі підтверджується значеннями похибок вимірювання, які не перевищують 8 %.

Kuznetsov H., Kharytonov Y.

Research program for a thermal energy storage model for a diesel engine

Summary. A research program has been developed to obtain experimental data on achieving the effective performance of a silencer thermal energy storage model. The main tasks of the experiment are to determine the melting intervals of the phase change material, the storage of heat in it with its subsequent release during crystallization to meet the general ship's needs, and their compliance with the calculated values of the mathematical model. In accordance with the tasks set, the scope of the experiments is justified, the characteristics of the experimental test bench also its information and measurement system are given, and the methods of processing and analyzing the results obtained are justified.

Keywords: thermal energy storage system, experiment, test bench, information and measurement system, charging, storage, discharging.

УДК 621.833.1

**МЕТОДИ НАРІЗАННЯ БОЧКОПОДІБНИХ ЗУБЦІВ СУДНОВИХ
ЗУБЧАСТИХ МУФТ****С. Ж. Боду, старший викладач¹, Д. А. Сорокін, магістрант²***кафедри інженерної механіки та технології машинобудування,**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,**м. Миколаїв, Україна**¹svitlana.bodu@nuos.edu.ua, ²dmitrijsorokindev@gmail.com*

Анотація. Розглянуто сучасні підходи до виготовлення зубчастих муфт із бочкоподібними зубцями, які використовуються у суднових трансмісійних системах. Висвітлено принципи формування коронкової поверхні зубця, типові похибки та методи їх компенсації, сучасні методи контролю точності профілю, зокрема 3D-сканування та координатні вимірювання.

Ключові слова: зубчаста муфта, бочкоподібний зубець, фрезерування, шліфування, контроль точності, суднові передачі.

Вступ. Зубчасті муфти відіграють важливу роль у суднових енергетичних установках, забезпечуючи передачу крутного моменту між валами навіть за наявності осьових, радіальних або кутових зміщень. В умовах експлуатації суден, де динамічні навантаження та температурні коливання є значними, надійність муфти визначається точністю виготовлення та формою зубців.

Для компенсації зміщень валів та зменшення крайових напружень у зоні контакту застосовується бочкоподібна (коронкова) форма зубців [1]. Така геометрія забезпечує плавний розподіл навантаження і підвищує довговічність з'єднання.

Ціль роботи – проаналізувати сучасні технології нарізання та контролю бочкоподібних зубців суднових зубчастих муфт, визначити вплив основних джерел похибок на надійність та довговічність муфт, а також обґрунтувати та оцінити ефективність застосування цифрових та безконтактних методів контролю для підвищення якості їх виготовлення та компенсації похибок.

Основна частина. Бочкоподібний зубець характеризується змінним профілем по ширині: товщина зубця зменшується від центру до країв, що призводить до зміщення контактної плями до середини.

Дослідження показують, що оптимальна форма коронки дозволяє знизити контактні напруження до 30–40 % у порівнянні з циліндричним профілем [2].

Математичне моделювання методом скінченних елементів [3] підтверджує, що при кутових зміщеннях валів бочкоподібний профіль зберігає стабільну площу контакту і менше схильний до локального перевантаження.

Найпоширенішим методом нарізання є хобінг (зубонарізання черв'ячною фрезою). Для створення бочкоподібного профілю застосовуються спеціальні схеми подачі – осьове коливання інструмента або програмне введення додаткової координати при обкатці.

Згідно з дослідженням [4], траєкторія подачі істотно впливає на форму коронки: при зміні амплітуди коливання на $\pm 0,2$ мм відбувається зміщення контактної зони на 8–10 % ширини зубця.

Для деталей підвищеної точності (муфти головних передач) застосовують тороїдальні фрези або шліфування профільованими кругами. Такий метод забезпечує пряму генерацію заданої кривизни.

Після шліфування часто виконується лазерне доведення або мікрошліфування для усунення залишкових нерівностей.

У сучасних системах з ЧПК передбачено автоматичну компенсацію зносу інструменту: датчики навантаження й температури коригують глибину різання в реальному часі, що мінімізує похибку профілю до 5 мкм [5].

Для матеріалів із високою твердістю застосовується електрохімічне формування профілю. Цей метод забезпечує високу чистоту поверхні ($Ra \approx 0,2$ мкм) і відсутність термічних зон, що є перевагою при виготовленні муфт для редукторів головного валу.

Комбіновані процеси (фрезерування + доведення + лазерна обробка) дозволяють скоротити похибку коронки до 0,01 мм при збереженні продуктивності.

Основними джерелами похибок під час виготовлення є:

- неточність базування заготовки;
- пружна деформація інструмента під час різання;
- похибка подачі або люфт системи переміщення;
- знос фрези;
- помилки програмного керування.

Наслідком таких похибок є несиметрична коронка або зміщення вершини кривизни відносно осі зубця.

Для компенсації використовують зворотний зв'язок: після кожного етапу нарізання проводиться вимірювання контрольних точок, і система ЧПК автоматично коригує траєкторію інструмента. Також застосовується балансування муфт перед монтажем, що дозволяє зменшити вібрації й шум при експлуатації.

Контроль точності бочкоподібного профілю включає кілька рівнів:

1. Контактні методи. Використовуються координатно-вимірювальні машини (КВМ) з точністю до 2–5 мкм. Вимірюється відхилення форми коронки та положення зубців відносно осі муфти. Класичний метод контактної плями (*Prussian Blue*) залишається ефективним: по розподілу фарби визначають рівномірність контакту під навантаженням.

2. Безконтактні методи. Застосовується лазерне 3D-сканування або оптична інтерферометрія, що дозволяє отримати повну хмару точок і порівняти поверхню з CAD-моделлю.

3. Випробування під навантаженням. На спеціальних стендах перевіряють стабільність контактного поля при різних крутних моментах. При зміні моменту на $\pm 20\%$ контрольна площа контакту повинна залишатись у межах центральної зони – критерій правильно сформованої коронки.

Висновки. 1. Використання бочкоподібної форми зубців дозволяє зменшити контактні напруження та рівномірно розподілити навантаження, що підвищує ресурс роботи муфт. 2. Сучасні технології нарізання, зокрема ЧПК-фрезерування та хобінг із адаптивною подачею, забезпечують точне формування коронки зубця. 3. Методи контролю, включно з лазерним 3D-скануванням, координатними вимірювальними машинами та традиційним *Prussian Blue*, дозволяють виявляти похибки та компенсувати їх на етапі виробництва. 4. Ефективна компенсація похибок виробництва досягається шляхом інтеграції цифрового контролю та корекційних алгоритмів, що в підсумку гарантує стабільну роботу муфт у морських умовах, суттєво зменшує вібрації та підвищує загальну довговічність передачі.

Список літератури

- [1] Guan, X., Zhao, H., Wang, C. et al. *Tooth contact analysis of crown gear coupling with longitude crowning and tip sphere teeth*. *Mechanism and Machine Theory*, 2018. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.418](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.12.418)
- [2] Wang, H., Li, Y., Zhang, L. *An accurate finite element model for tooth contact and meshing force distribution of crown gear coupling*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2025. DOI: [10.1007/s12206-025-0436-6](https://doi.org/10.1007/s12206-025-0436-6)
- [3] Iñurritegui, I., Valle, J., Ugarte, L., Gorrotxategi, I. *Numerical-experimental analysis of highly crowned spherical gear couplings working at high misalignment angles*. *Mechanism and Machine Theory*, 2023. DOI: [10.1016/j.mechmachtheory.2023.105260](https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2023.105260)
- [4] Li, Z., Liu, Y., Zhang, Q. *Clearance distribution and contact characteristics of misaligned gear couplings considering hob feed path*. *Scientific Reports*, 2025. DOI: [10.1038/s41598-024-79365-4](https://doi.org/10.1038/s41598-024-79365-4)
- [5] Wei, C., Yao, L., Zhang, X. *Contact analysis and surface optimization of crowning gear coupling*. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2016. DOI: [10.2495/HPSM160421](https://doi.org/10.2495/HPSM160421)

Bodu S., Sorokin D.

Methods of Cutting Barrel-Shaped Teeth of Marine Gear Couplings

Modern technologies for the manufacture and inspection of barrel-shaped (crowned) teeth in marine gear couplings are analyzed. Particular emphasis is given to CNC machining, grinding, and combined finishing techniques, alongside digital inspection methods such as 3D laser scanning and coordinate measurement. Current international studies are reviewed, confirming that crowned profiles significantly improve load distribution, reduce stress peaks, and extend service life under shaft misalignment conditions.

Keywords: gear coupling, crowned tooth, machining, grinding, inspection, marine transmissions.

УДК 621.833.1

ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ**С. Ж. Боду, старший викладач¹, Д. С. Гудь, магістрант²***кафедри інженерної механіки та технології машинобудування,**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,**м. Миколаїв, Україна**¹svitlana.bodu@nuos.edu.ua, ²dmigud1991@gmail.com*

Анотація. Розглянуто сучасні напрями підвищення зносостійкості зубчастих поверхонь за рахунок удосконалення інструменту, технології різання та зміцнення. Проаналізовано інструментальні матеріали, покриття, геометрію ріжучих елементів і комбіновані методи механічної та термомеханічної обробки. Запропоновано підхід до оцінювання ефективності інструменту за результатами контролю шорсткості та мікротвердості.

Ключові слова: зубчасті колеса, інструмент, зносостійкість, покриття, мікротвердість, технологія різання.

Вступ. Сучасні тенденції у машинобудуванні вимагають підвищення надійності та довговічності деталей, які працюють у складних умовах навантаження. Особливо це стосується зубчастих коліс, що зазнають постійних динамічних навантажень, тертя та впливу високих температур у зоні контакту. Тому розробка ефективних інструментів і технологічних методів для зміцнення робочих поверхонь залишається актуальною науково-технічною задачею [1].

Зубчасті передачі є одними з найпоширеніших елементів механічних систем, які забезпечують передавання крутного моменту та руху. Основною причиною виходу з ладу таких механізмів є зношування зубчастих поверхонь, що виникає під дією контактних напружень, тертя та мікропластичних деформацій [2].

Для підвищення надійності зубчастих коліс застосовують комплекс технологічних рішень – від вибору матеріалу до вдосконалення інструментів і методів обробки. Останнім часом усе більшого значення набувають методи, які дозволяють поєднати високоточну механічну обробку з поверхневим зміцненням без зниження точності профілю [3].

Підвищення зносостійкості можливе як за рахунок оптимізації геометрії ріжучого інструменту, так і завдяки впровадженню сучасних покриттів, що знижують коефіцієнт тертя та підвищують твердість робочих поверхонь [4].

Метою дослідження є аналіз конструктивних та технологічних рішень щодо підвищення зносостійкості зубчастих поверхонь за допомогою інструментів із модифікованими геометричними параметрами та прогресивними покриттями, а також оцінка ефективності цих рішень з позицій стабільності процесу різання та довговічності інструменту.

Основна частина. Одним із головних чинників, що впливають на зносостійкість зубчастих поверхонь, є параметри шорсткості після обробки. Для їх контролю вирішальне значення має форма різальної кромки, кут нахилу та радіус заокруглення інструменту. При оптимізації геометрії ріжучої частини зменшуються мікротріщини та температурні градієнти у зоні різання [5].

Перспективними є інструменти з наноструктурованими покриттями типу TiAlN, CrN та AlCrSiN, нанесеними методом фізичного осадження з парової фази (PVD). Такі покриття забезпечують високу твердість (до 3500 HV) і термостійкість до 900 °C, що дозволяє збільшити стійкість інструменту в 2–3 рази порівняно зі стандартним твердосплавним без покриття [6].

Крім того, широко застосовуються комбіновані технології обробки, які включають прецизійне шліфування з одночасною ультразвуковою або магнітно-абразивною активацією поверхні. Ці методи забезпечують вирівнювання мікронерівностей, зменшення коефіцієнта тертя та утворення зміцненого шару глибиною до 30 мкм [7].

У технологіях підвищення твердості та зносостійкості важливу роль відіграють термічні методи: індукційне гартування, цементація, нітроцементація, лазерне легування.

Особливу увагу приділяють лазерному зміцненню, при якому енергія променю локально розплавляє поверхневий шар, утворюючи тонку мартенситну зону без викривлень. Сучасні системи мають автоматичну стабілізацію фокусування та контролю температури в зоні впливу.

Інструмент для лазерної обробки зубчастих поверхонь включає оптичну головку з адаптивним керуванням та механізм повороту, що дозволяє рівномірно обробляти бічні поверхні зуба при змінному куті нахилу. Такі системи використовуються у виробництві суднових редукторів та турбінних муфт, де вимоги до зносостійкості особливо високі.

Додатковим методом механічного зміцнення, що ефективно доповнює комбіновані технології, є кульова обкатка (*ball burnishing*). Інструмент являє собою головку з карбідним роликком, який під тиском деформує мікрошар поверхні, ущільнюючи матеріал та створюючи стискуючі напруження. Це знижує схильність до мікротріщин і втомного зносу, а також покращує якість поверхні після шліфування

Окрему увагу приділено інструментам для чистового фрезерування і шліфування зубців, які мають змінні пластини зі спеціально профільованими вершинами. Їх використання дозволяє контролювати локальні зони тиску, зменшуючи ризик мікровикришування, особливо під час обробки цементованих або азотованих сталей [8].

Контроль якості оброблених поверхонь виконується за параметрами Ra , Rz , $Rmax$, а також мікротвердості HV. У сучасних лабораторіях для контролю застосовують оптичні профілометри та лазерні 3D-сканери, що дозволяють будувати карту розподілу шорсткості та оцінювати стабільність обробки у динаміці [9].

У процесі досліджень встановлено, що підвищення зносостійкості зубців досягається не лише вибором матеріалу покриття, але й точним узгодженням його мікротвердості з твердістю

оброблюваного матеріалу. Оптимальне співвідношення твердості інструменту до заготовки має складати 1,3–1,5. Перевищення цього співвідношення призводить до утворення тріщин у покритті [10].

Висновки. 1. Зносостійкість зубчастих поверхонь значною мірою визначається якістю інструменту, його геометрією та фізико-механічними властивостями покриття. 2. Використання наноструктурованих покриттів TiAlN, AlCrSiN та CrN підвищує довговічність інструменту у 2–3 рази без втрати точності профілю. 3. Комбіновані методи обробки із використанням ультразвукової або магнітно-абразивної дії забезпечують формування зміцненого шару і зменшують шорсткість поверхні. 4. Механічне зміцнення методом кульової обкатки створює стискуючі напруження, що запобігають мікротріщинам і підвищують опір втомному руйнуванню. 5. Системний контроль параметрів Ra , Rz і мікротвердості дозволяє об'єктивно оцінювати ефективність інструменту і прогнозувати термін служби зубчастих коліс. 6. Оптимальне співвідношення твердості інструменту до заготовки (1,3–1,5) забезпечує стабільність покриття й мінімізує ризик його тріщиноутворення.

Список літератури

- [1] Zhou, W., et al. *Wear behavior of gear materials under mixed lubrication conditions*. Tribology International, 2023. DOI:10.1016/j.triboint.2023.108021.
- [2] Chen, X., et al. *Influence of surface roughness on pitting failure of gear teeth*. Wear, 2021. DOI:10.1016/j.wear.2021.203801.
- [3] Wang, T., & Liu, Y. *Hybrid processing technologies for surface strengthening of gears*. Materials & Design, 2020. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108964.
- [4] Li, P., et al. *Advanced coatings for cutting tools: A review*. Coatings, 2022. DOI:10.3390/coatings12010122.
- [5] Xu, J., et al. *Optimization of tool geometry for minimum wear and surface roughness*. Journal of Manufacturing Processes, 2024. DOI:10.1016/j.jmapro.2024.02.003.
- [6] Kim, H., et al. *TiAlN and AlCrSiN coatings for enhanced cutting tool performance*. Surface & Coatings Technology, 2023. DOI:10.1016/j.surfcoat.2023.130912.
- [7] Zhao, L., et al. *Ultrasonic-assisted grinding of hardened steels for surface integrity improvement*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2022.103918.
- [8] Kaczmarek, W. *Design of replaceable insert tools for finishing of gear teeth*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021. DOI:10.1115/1.4049258.
- [9] Singh, A., et al. *Laser scanning methods for 3D surface roughness analysis*. Measurement, 2024. DOI:10.1016/j.measurement.2024.115941.
- [10] Petrov, I., et al. *Coating–substrate compatibility and residual stress analysis*. Surface Engineering, 2023. DOI:10.1080/02670844.2023.2248150.

INSTRUMENTS FOR IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF GEAR SURFACES

Bodu S., Gud D.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Mykolayiv, Ukraine

Abstract: The paper considers modern approaches to improving the wear resistance of gear surfaces through optimization of cutting tools and coatings. Emphasis is placed on the effect of tool geometry, nanostructured coatings, and hybrid finishing processes on surface integrity and microhardness. The role of quality control and digital roughness assessment methods is also discussed.

Keywords: gear surface, wear resistance, tool geometry, coating, roughness, strengthening technology.

УДК 697.3:621.577.4

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ТУРБОКАМІНА З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ МОДУЛЕМ ДЛЯ СУДНОВИХ І ПРИБЕРЕЖНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Ю. О. Шаповалов, к. т. н., доцент¹, М. М. Семенов, зав. лаб², А. П. Головня, аспірант³,

Є. М. Романюкін, аспірант⁴

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна

¹yuriy_shapovalov_2011@ukr.net, ²mukola.semenov@nuos.edu.ua, ³holovnia981@gmail.com,

⁴romaniukin.nuk@gmail.com

Анотація. У роботі представлено концепцію інтегрованої системи автономного теплопостачання, побудованої на базі турбокаміна з подвійною водяною сорочкою та вбудованою термоелектричною батареєю. Така система забезпечує комбіноване виробництво теплової та електричної енергії, що дозволяє значно підвищити енергоефективність опалення та зменшити залежність від зовнішніх джерел живлення. Приведено теплотехнічну схему, алгоритм автоматичного керування на базі мікроконтролера Arduino, а також проведено енергетичні розрахунки продуктивності системи. Запропоноване рішення може бути адаптоване для використання в суднових або прибережних умовах, де критичною є автономність, енергонезалежність та можливість роботи з кількома джерелами палива.

Ключові слова: інтегроване теплопостачання, турбокамін, елементи Пельтьє, термоелектрична генерація, автономна енергосистема.

Вступ. Дослідження присвячене розробці енергоефективної комбінованої системи опалення, яка здатна одночасно генерувати теплову та електричну енергію. Основна ідея роботи полягає у створенні інтегрованої системи теплопостачання, що поєднує турбокамін з подвійною водяною сорочкою та термоелектричною батареєю на основі елементів Пельтьє. Така система забезпечує автономність, зменшення споживання енергоресурсів і гнучке керування джерелами тепла залежно від вартості палива й часу доби [1–3].

Методологія. У роботі описано та виконано:

- **Теоретичний аналіз** існуючих систем опалення, критеріїв їх енергоефективності та способів комбінування джерел тепла (газ, тверде паливо, електрика, сонячна енергія).
- **Моделювання конструкції турбокаміна** з двома водяними сорочками, між якими розташовано термоелектричну батарею.
- **Принципова схема** інтегрованої системи опалення будинку з можливістю перемикання між джерелами тепла (турбокамін, електрокотел, сонячний колектор).

- **Алгоритм керування** на базі мікроконтролера *Arduino*, який автоматично регулює роботу насосів, клапанів та засувки відповідно до температурних датчиків і заданих параметрів

Основні результати

- Описано **турбокамін з подвійною водяною сорочкою**, який дозволяє:
 - підтримувати оптимальний температурний перепад для роботи елементів Пельтьє;
 - забезпечувати циркуляцію теплоносія двома контурами;
 - уникати перегріву за рахунок автоматичного зливу надлишкової води.
- Створено **ефективну схему комбінованого теплопостачання**, що включає турбокамін, електрокотел, буферний бак, інтегратор і систему автоматизації.
- Розраховано потужність системи: три турбокаміни потужністю по 34 кВт забезпечують **72 кВт теплової енергії та 7,5 кВт електроенергії**.
- Запропонований **алгоритм автоматичного керування** дозволяє в реальному часі перемикатися між джерелами енергії для мінімізації витрат.

Висновки. Запропонована система є енергонезалежним рішенням для житлових будинків і об'єктів без стабільного електропостачання. Вона поєднує високу теплотехнічну ефективність з автоматизованим контролем і можливістю використання кількох видів палива. Розробка має перспективи впровадження у суднову енергетику, автономні модульні споруди, сільські та прибережні об'єкти. Таким чином, робота робить внесок у розвиток інтелектуальних енергосистем, підвищує енергетичну безпеку та сприяє переходу до сталого енергоспоживання.

Список літератури

1. Mazhar, A. R., Khan, A., & Uddin, M. (2023). *Investigation of the simultaneous cooling and heating using a thermoelectric Peltier*. **Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Materials**, 1–6. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/373757876>
2. International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science. (2025). *Analysis of refrigeration and heating using Peltier module*. Retrieved from https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/issue_3_march_2025/70391/final/fin_irjmets174314635_2.pdf
3. Zhang, Y., Li, X., & Wu, J. (2022). *Hybrid photovoltaic/thermoelectric systems for round-the-clock operation*. **Molecules**, 27(21), 7590. <https://doi.org/10.3390/molecules27217590>

Y. Shapovalov, M. Semenov, A. Holovnia, E. Romaniukin

Integrated system of autonomous heat supply based on a turboburner with a thermoelectric module for ship and coastal energy systems

Abstract. The paper presents a concept of an integrated autonomous heating system based on a turbo-fireplace with a dual water jacket and a built-in thermoelectric battery. This system enables combined production of thermal and electric energy, significantly increasing heating efficiency and reducing dependency on external power sources. A thermal scheme, control algorithm based on an Arduino microcontroller, and energy performance calculations were developed. The proposed solution can be adapted for shipboard and coastal applications where autonomy, energy independence, and multi-fuel operation are critical.

Keywords: integrated heating system, turbo-fireplace, peltier elements, thermoelectric generation, autonomous energy system

УДК 621

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ ШЛЯХОМ
ВПРОВАДЖЕННЯ ТРИГЕНЕРАЦІЙНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ****Ю. О. Шаповалов**, к. т. н., доцент¹, **М. М. Семенов**, зав. лаб², **В. В. Елькін**, студ.³гр. 4241, **О. О. Смірнова**, студ.⁴ гр. 2241,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна

¹yuriy_shapovalov_2011@ukr.net, ²mukola.semenov@nuos.edu.ua,³elkinvlad2004@gmail.com, ⁴olyasmirnova9412@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто проблему енергозабезпечення компресорних станцій газотранспортної системи, які потребують одночасного виробництва електричної, теплової енергії та холоду. Відсутність аварійних джерел енергії у традиційних схемах призводить до зниження надійності та ефективності роботи обладнання під час аварійних режимів. Запропоновано використання тригенераційної установки на базі газопоршневого двигуна, яка дозволяє комплексно утилізувати енергію відпрацьованих газів та забезпечувати стабільне функціонування систем очищення, охолодження і автоматизованого керування. Розроблена схема забезпечує зменшення кількості необхідного обладнання, підвищення надійності, енергоефективності та економічності роботи компресорних станцій.

Ключові слова: компресорна станція, когенерація, тригенерація, газопоршневий двигун, теплоутилізатор, вихрова труба, енергоефективність.

Вступ. Компресорні станції є ключовими елементами газотранспортної системи та потребують одночасного забезпечення електричною, тепловою енергією та холодом. У традиційних схемах відсутні аварійні джерела енергопостачання, що призводить до зниження надійності роботи блоків очистки, охолодження та автоматизованого керування під час аварійних відключень [1].

Мета дослідження. Розробка тригенераційної установки (ТГУ), здатної одночасно виробляти електричну, теплову енергію та холод для безперебійного функціонування компресорних станцій.

Методологія

- Аналіз існуючих когенераційних систем та їхніх недоліків (неповне використання теплоти димових газів, високі витрати енергії теплових насосів, відсутність холодопродукції). [2]
- Синтез принципової схеми тригенераційної установки на базі газопоршневого двигуна з використанням теплоутилізаторів і вихрової труби.
- Використання патентних рішень для поєднання когенераційного і тригенераційного режимів.

Основні результати

Принципова схема роботи газопоршневої електростанції в когенераційному і тригенераційному режимах показана на рис. 1.

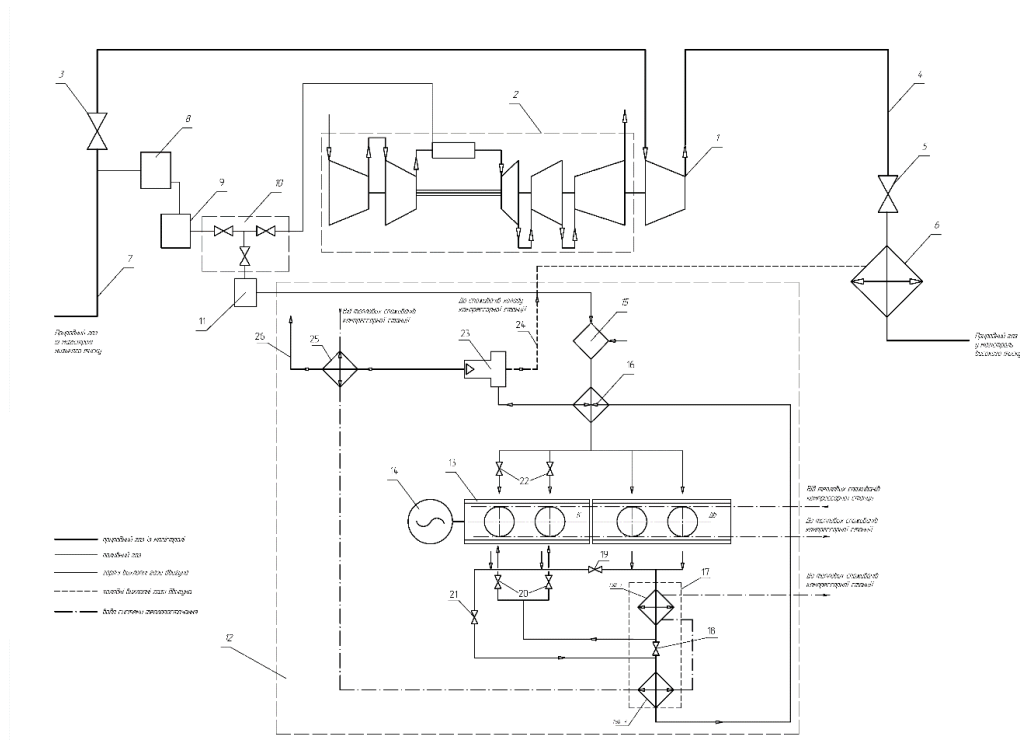


Рис.1 – Принципова схема роботи газопоршневої електростанції в когенераційному і тригенераційному режимах

Згідно до Пат. № 100200 компресорна станція працює наступним чином. Транзитний природний газ через крановий вузол 3 надходить до газотурбінного двигуна 2 з компресором природного газу 1, де відбувається підвищення робочого тиску та температури транзитного природного газу. Після цього природний газ надходить у магістральний газопровід з підвищеним тиском 4 і через крановий вузол 5 до установок охолодження природного газу 6, які з'єднані із холодопроводом тригенераційної установки.

Природний газ, призначений для технологічних потреб, поступає з ділянки магістрального газопроводу з пониженим тиском 7 до кранового вузла 3 у блок очистки газу 8, після чого у блок підготовки паливного, пускового та імпульсного газів 9 і через кранові вузли 10 і пристрій обліку газу 11 надходить у тригенераційну установку 12. У процесі роботи тригенераційної установки 12 виробляється холод, тепла та електрична енергії.

1. Розроблена тригенераційна установка забезпечує:

- **тепло** – для опалення приміщень і підігріву газу,
- **електроенергію** – для роботи автоматизованих систем та освітлення,
- **холод** – для охолодження природного газу.

2. Запропонована схема зменшує кількість необхідного обладнання, підвищує надійність та енергоефективність роботи компресорних станцій.

3. Досягається утилізація енергії відпрацьованих газів та зменшення експлуатаційних витрат [3].

Висновки. Використання тригенераційної установки у складі компресорних станцій дозволяє підвищити економічність, енергоефективність і надійність газотранспортної системи. Результати дослідження мають практичну значимість для енергетичного забезпечення об'єктів газової промисловості України.

Список літератури

1. Silva, P., Bischi, A., Lamberti, M., Campanari, S., Macchi, E., Tacchinardi, D. (2019). *Trigenerative solution for natural gas compressor stations: A north Italian test case*. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.154
2. Chowdhury, N. H. K., & Povey, T. (2024). High-accuracy experimental study of performance characteristics of optimised Ranque–Hilsch vortex tube. *Applied Thermal Engineering*, 251, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123385>
3. Nourpour, M., & Khoshgoftar Manesh, M. H. (2022). Evaluation of novel integrated combined cycle (gas turbine–SOFC–steam turbine–ORC) for gas turbo compressor station. *Energy Conversion and Management*, 252, 115050. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115050>

Y. Shapovalov, M. Semenov, V. Elkin, O. Smirnova

Increasing the reliability of compressor stations through the implementation of trigeneration energy systems

Abstract. The paper addresses the problem of energy supply for compressor stations of the gas transmission system, which require simultaneous production of electricity, heat, and cooling. The absence of emergency energy sources in conventional schemes reduces the reliability and efficiency of equipment operation under emergency conditions. A trigeneration system based on a gas engine is proposed, enabling comprehensive utilization of exhaust gas energy and ensuring stable operation of purification, cooling, and automated control systems. The developed scheme reduces the amount of required equipment, while improving the reliability, energy efficiency, and cost-effectiveness of compressor stations.

Keywords: compressor station, cogeneration, trigeneration, gas engine, heat recovery unit, vortex tube, energy efficiency.

УДК 621.311.22

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МІКРОТУРБІННИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК У КОМУНАЛЬНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Д. М. Соломонюк, стейкхолдер, к. т. н.¹, М. М. Семенов, зав. лаб², Ю. О. Шаповалов,
к. т. н., доцент³, Я. В. Плужник, студ.⁴

¹ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» м. Миколаїв, Україна;

^{2,3,4}Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна

¹dns_wrk@ukr.net, ²mukola.semenov@nuos.edu.ua, ³yuriy_shapovalov_2011@ukr.net, ⁴
yana1979pluzhnik@gmail.com

Анотація. У роботі розглянуто актуальність впровадження децентралізованих когенераційних установок (КГУ) для забезпечення автономного енергопостачання стаціонарних

об'єктів. Виконано порівняльний аналіз газопоршневих двигунів і мікротурбінних установок за енергетичними, надійнісними та екологічними показниками. Проведено термодинамічні розрахунки циклів мікроГТУ (простого, регенеративного, з утилізацією теплоти), а також моделювання добових графіків енергоспоживання житлового будинку. Встановлено, що мікротурбінні установки з регенерацією теплоти забезпечують електричний ККД на рівні 32–35 % та коефіцієнт використання палива до 91%, що робить їх оптимальним рішенням для малопотужних об'єктів. Запропоновані схеми з акумуляційним баком та комбінованим котлом-утилізатором дозволяють підвищити енергетичну ефективність і надійність постачання. Отримані результати підтверджують доцільність використання мікроГТУ для децентралізації енергетики України та зниження втрат при виробництві й транспортуванні енергії.

Ключові слова: когенераційні установки, мікротурбіни, газопоршнєві двигуни, регенерація теплоти, автономне енергопостачання

Актуальність дослідження. Раціональне використання енергоресурсів та підвищення ефективності виробництва енергії є стратегічним завданням енергетичної політики України. Зношеність та низька ефективність централізованих систем теплопостачання зумовлюють значні втрати енергії, що актуалізує потребу у впровадженні децентралізованих енергетичних рішень. Перспективним напрямом є когенераційні установки (КГУ), які дозволяють одночасно виробляти теплову та електричну енергію, підвищуючи ефективність використання палива й зменшуючи негативний вплив на довкілля [1].

Мета дослідження. Обґрунтувати вибір та розробити оптимальну схему когенераційної установки для автономного енергопостачання житлових та комунальних об'єктів, забезпечивши високі показники економічної доцільності, екологічної безпеки та енергетичної ефективності.

Методологія. У роботі виконано: порівняльний аналіз газопоршневих двигунів (ГПД) та мікротурбінних установок (МТУ) за енергетичними, надійнісними та екологічними показниками; термодинамічні розрахунки циклів мікроГТУ (простого, регенеративного, з утилізацією тепла); моделювання добових графіків енергоспоживання житлового будинку та відпрацювання схем автономного енергопостачання.

Результати дослідження.

1. Газопоршнєві установки забезпечують високий електричний ККД (до 40 %), проте обмежені роботою при часткових навантаженнях та мають значні експлуатаційні недоліки (масогабаритність, витрата мастила, викиди) [2].
2. Мікротурбінні установки характеризуються меншими викидами NO_x і CO, низьким рівнем шуму, великим ресурсом роботи та здатністю приймати 100 % навантаження одномоментно.

3. Використання регенерації теплоти дозволяє підвищити електричний ККД мікроГТУ до 32–35 % та коефіцієнт використання палива – до 86–91% [3].

4. Найбільш ефективними виявились схеми з акумуляційним баком та з комбінованим котлом-утилізатором, що забезпечують стабільне покриття добових графіків споживання.

Оптимальні параметри мікроГТУ:

- максимальна температура газу перед турбіною – 1150 °C;
- ступінь стиску – 4;
- ступінь регенерації – 0,85;
- електричний ККД – 32,6 %;
- відношення теплопродуктивності до потужності – $Q/Ne = 1,85$.

Висновки. Запропоновано використовувати мікротурбінні когенераційні установки з регенерацією теплоти як базовий варіант для автономного енергопостачання житлових та комунальних об'єктів. Їх впровадження дозволить знизити втрати енергії, підвищити екологічну безпеку та надійність постачання. Розвиток таких систем в Україні сприятиме децентралізації енергетики та наближенню до європейських стандартів, де частка когенерації сягає 18–50 %, тоді як в Україні вона становить лише близько 0,5 %.

Список літератури

1. Calise, F., Cappiello, F. L., Dentice d'Accadia, M., & Vicidomini, M. (2022). *The role of micro gas turbines in the energy transition: A comprehensive review*. *Energies*, 15(23), 9029. <https://doi.org/10.3390/en15239029>
2. Khartchenko, N. V., Khartchenko, I. N., & Rosen, M. A. (2020). *New insights into the potential of the gas microturbine: Applications, recent advances, and prospects*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129, 109917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109917>
3. Carapellucci, R., & Milazzo, A. (2016). *Repowering combined cycle power plants by means of gas turbine inlet air cooling and cogeneration systems*. *Energy*, 109, 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.102>

D. Solomonyuk, Y. Shapovalov, M. Semenov, Y. Pluzhik

Research on the efficiency of microturbine cogeneration plants in municipal power

Abstract. *The paper examines the relevance of introducing decentralized cogeneration units (CGUs) to ensure autonomous energy supply for stationary facilities. A comparative analysis of gas piston engines and microturbine units was carried out in terms of energy, reliability, and environmental performance. Thermodynamic calculations of micro-GTU cycles (simple, regenerative, with heat utilization) were performed, as well as modeling of daily energy consumption profiles of a residential building. It was established that microturbine units with heat regeneration provide an electrical efficiency of 32–35% and a fuel utilization factor of up to 91%, making them an optimal solution for low-power facilities. The proposed schemes with an accumulation tank and a combined waste heat boiler allow for higher energy efficiency and reliability of supply. The results confirm the feasibility of using micro-GTUs for the decentralization of Ukraine's energy sector and for reducing losses in energy production and transportation.*

Keywords: *cogeneration units, microturbines, gas piston engines, heat regeneration, autonomous energy supply.*

УДК 66.045:621.981

ЗАСТОСУВАННЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ЖОРСТКОПЛАСТИЧНОГО ЗГИНУ РОЗТЯГНУТОЇ ШТАБИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

А. В. Новошицький, канд. техн. наук¹, С. Ж. Боду, старший викладач²,

Д. В. Фабріциєв, аспірант³, О. Ю. Нартя, студ. кафедри ІМ та ТМ,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹ anton.novoshytskyy@nuos.edu.ua, ² svitlana.bodu@nuos.edu.ua,

³ dmytro.fabritsyiev@gmail.com

Анотація. У роботі представлено рішення задачі жорсткопластичного згину штаби, яка перебуває під дією поздовжнього пружного розтягу. Проведено аналіз напружено-деформованого стану матеріалу в умовах комбінованого навантаження та встановлено закономірності впливу поздовжньої осьової сили на зменшення необхідного згинального моменту та пружинення. Отримані розрахункові залежності можуть бути використані при визначенні технологічних параметрів виготовлення тонкостінних елементів теплообмінних апаратів.

Ключові слова: теплообмінні апарати, профілювання, жорсткопластичний згин, поздовжній розтяг, технологічні параметри.

Вступна частина. Підвищення ефективності теплообмінних апаратів напряму пов'язане з удосконаленням технологій виготовлення їх теплопередаючих елементів та інших деталей. Для забезпечення високої точності формоутворення та зменшення енергомісткості процесів необхідно застосовувати технологічні підходи, що дозволяють контролювати напружено-деформований стан матеріалу під час формування.

Одним із перспективних напрямів є профілювання тонкостінних елементів при дії поздовжнього розтягу [1–3], що забезпечує стабільність розмірів, зменшує пружинення та запобігає утворенню хвилястості.

Метою роботи є створення інженерної методики визначення силових параметрів технологічного процесу при профілюванні тонкостінних заготовок з урахуванням дії поздовжньої сили розтягу. Це дозволить здійснювати коректне налаштування устаткування та розраховувати геометрію технологічного оснащення.

Основна частина. Для встановлення закономірностей деформування штаби використано аналітичний підхід на основі деформаційної теорії пластичності. Процес розглядався для ідеального жорсткопластичного матеріалу з лінійним зміцненням. Прийнято гіпотезу плоских перерізів. Розтягнута штаба навантажувалась згинальним моментом.

Було виявлено вплив поздовжніх напружень на розподіл тангенціальних напружень у стиснутій і розтягнутій зонах поперечного перерізу, а також на положення нейтрального шару напружень.

Аналітичні залежності для визначення положення нейтрального шару напружень та величини згинального моменту від відносної кривизни штаби і сили розтягу отримано у безрозмірній формі. Встановлено, що зі збільшенням сили поздовжнього розтягу необхідний згинальний момент істотно зменшується, також знижується пружинення.

Розрахункові вирази використані для створення методики інженерного розрахунку налаштувань профілювального устаткування [2, 4, 5] та геометрії профілювального устаткування.

Висновки. 1. Проведено аналітичне дослідження жорсткопластичного згину штаби під дією поздовжнього розтягу, визначено вплив розтягувальних напружень на положення нейтрального шару, величину необхідного згинального моменту та пружинення. 2. Отримані розрахункові залежності можуть бути використані для розрахунків технологічних параметрів процесу профілювання та геометрії відповідного технологічного оснащення. 3. Застосування розробленої методики дозволяє визначати силові параметри та забезпечувати точність геометрії профільованих тонкостінних елементів теплообмінних апаратів.

Список літератури

- [1] Новошицький А. В. Експериментальне дослідження процесу виготовлення рифлених профілів розтяганням. *Збірник наукових праць НУК*. 2010. № 4. С. 25–31.
- [2] Удосконалена технологія та устаткування для виготовлення тонкостінних профільованих деталей теплообмінних апаратів [Текст] / А. В. Новошицький, С. Ж. Боду, Д. В. Фабріцієв // *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – 2024. – С. 154-156.
- [3] Пат. UA 44451 Україна. Спосіб виготовлення гнутих профілів [Текст] / С. М. Соловійов, А. В. Новошицький – № 2001031674 ; заявл. 12.03.2001; опубл. 15.02.2002. – Бюл. № 2.
- [4] Пат. UA 43149 Україна. Розтяжна машина [Текст] / С. М. Соловійов, А. В. Новошицький. – № 2001031675 ; заявл. 12.03.2001; опубл. 15.11.2001. – Бюл. № 10.
- [5] Пат. UA 55029 Україна. Розтяжна машина [Текст] / С. М. Соловійов, А. В. Новошицький. – № 2002064965 ; заявл. 17.06.2002; опубл. 17.03.2003. – Бюл. № 3.

Anton Novoshytskyi, Svitlana Bodu, Dmytro Fabritsyiev, Aleksandr Nartya

Application of the solution to the problem of rigid-plastic bending of a stretched strip to determine the parameters of the manufacturing technology of thin-walled parts of heat exchangers

The work provides a solution to the problem of rigid-plastic bending of an elastically stretched staff. It has been established that when bending a stretched staff, the required bending moment is significantly reduced, and the springback also decreases. The obtained dependencies are necessary for determining the parameters of the technology for manufacturing thin-walled parts of heat exchangers.

Keywords: heat exchangers; profiling technology; rigid-plastic bending; longitudinal tension; process parameters.

УДК 66.045:621.981

ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ЗІ СФЕРИЧНИМИ ВИСТУПАМИ ТА ЗАГЛИБЛЕННЯМИ

А. В. Новошицький, канд. техн. наук¹, С. Ж. Боду, старший викладач²,

Д. В. Фабріциєв, аспірант³, М. Г. Гриник, студ. кафедри ІМ та ТМ,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹ anton.novoshytskyy@nuos.edu.ua, ² svitlana.bodu@nuos.edu.ua,

³ dmytro.fabritsyiev@gmail.com

Анотація. Запропоновано технологію виготовлення тонкостінних плоских деталей теплообмінних апаратів із рельєфом у вигляді сферичних виступів та заглиблень. Формоутворення здійснюється шляхом локального профілювання штаби під дією поздовжнього розтягу за допомогою роликів з відповідним рельєфом. Встановлено, що поздовжня сила розтягу істотно впливає на стабільність форми, запобігаючи хвилястості біля сферичних елементів і на краях заготовки. Розроблена технологія забезпечує підвищену точність виготовлення та може бути адаптована до серійного виробництва.

Ключові слова: теплообмінні апарати, профілювання, поздовжній розтяг, сферичні виступи, інтенсифікація тепловіддачі.

Вступна частина. Інтенсифікація теплообміну є важливим напрямом підвищення енергоефективності промислових теплообмінних систем. Сучасні дослідження спрямовані на створення поверхонь із рельєфом, який сприяє турбулізації потоку теплоносія та збільшенню площі теплопередачі. Перспективним рішенням є застосування плоских елементів із системою сферичних виступів та заглиблень, що діють як інтенсифікатори тепловіддачі [1–3].

Виготовлення таких деталей потребує технології, здатної забезпечити високу точність і відсутність дефектів поверхні при мінімальних енерговитратах, що не завжди можна досягти використанням вже існуючих технологій [4–6].

Використання поздовжнього розтягу заготовки в процесі профілювання дає змогу уникнути хвилястості кромek, поздовжньої кривизни та залишкових деформацій, характерних для традиційних технологій.

Метою роботи є розробка та експериментальна апробація технології виготовлення тонкостінних плоских елементів теплообмінних апаратів зі сферичними виступами та заглибленнями з використанням профілювання розтягнутої заготовки.

Основна частина. Технологію виготовлення тонкостінних плоских деталей теплообмінних апаратів із рельєфом у вигляді сферичних виступів та заглиблень було розроблено на підґрунті способу виготовлення рифлених профілів [7] (рис. 1).

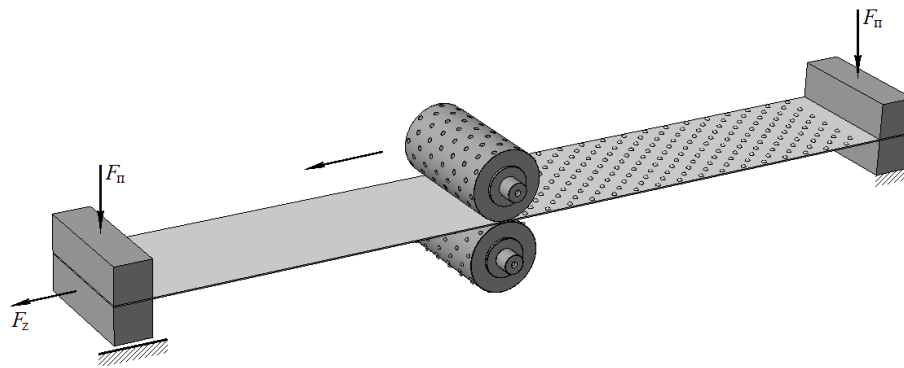


Рисунок 1 – Схема процесу профілювання з поздовжнім розтягом

Дослідження проводились на експериментальній установці, розробленій авторами. Ролики для профілювання було виготовлено зі сталі 45; рельєф роликів з сферичними виступами створювався шляхом запресування сталейних кульок. В якості заготовки була латунна штаба (Л63), товщиною 0,4 мм і шириною 74 мм. Профілювальні ролики та зразок виготовленої деталі з рельєфом сферичної форми наведено на рис. 2.

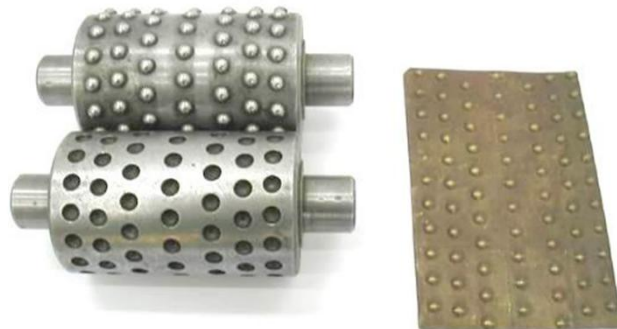


Рисунок 2 – Ролики для профілювання та зразок виготовленої деталі з рельєфом сферичної форми

Під час випробувань, виготовлення партій деталей проводилося при різних значеннях поздовжньої сили розтягу.

Експериментальні дослідження підтвердили, що при відсутності, або недостатньому розтязі на поверхні заготовки виникає хвилястість та поздовжня кривизна. Зі збільшенням сили розтягу до значень, що наближуються, або відповідають межі текучості матеріалу, поверхня стає стабільною, а геометрія виступів – рівномірною.

Запропонований спосіб дозволяє уникнути попередньої правки заготовки, скоротити кількість операцій та отримати високу повторюваність форми.

Висновки. 1. Проведено експериментальну апробацію технології формоутворення тонкостінних штабових деталей зі сферичними виступами та заглибленнями. 2. Доведено, що поздовжня сила розтягу стабілізує процес формоутворення та сприяє усуненню хвилястості кромки і поздовжньої кривизни деталей. 3. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні промислового устаткування для виробництва плоских деталей зі сферичними виступами та заглибленнями, що використовуються у теплообмінних апаратах.

Список літератури

1. Ying P., He Y., Tang H., Ren Y. Numerical and Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in Heat Exchanger Channels with Different Dimples Geometries. *Machines*. 2021. Vol. 9, no. 4. P. 72. DOI: 10.3390/machines9040072.
2. Rao Y., Li B., Feng Y. Heat transfer of turbulent flow over surfaces with spherical dimples and teardrop dimples. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. Vol. 61. P. 201–209. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.10.030.
3. Webb R. L., Kim N.-H. Principles of enhanced heat transfer. 2nd ed. New York : Taylor & Francis, 2005. 772 p.
4. Boljanovic V. Sheet metal forming processes and die design. New York : Industrial Press, 2004. 219 p.
5. Roberts W. L. Cold Rolling of Steel. New York : CRC Press, 1978. 808 p. DOI: 10.1201/9781315139661.
6. Halmos G. T. Roll Forming Handbook. Boca Raton : Taylor & Francis, 2006. 583 p. DOI: 10.1201/9781420030693.
7. Пат. 79278 Україна. Спосіб виготовлення рифлених профілів / С. М. Соловйов, А. В. Новошицький. № 20041008663 ; заявл. 25.10.2004 ; опубл. 11.06.2007, Бюл. № 8.

Anton Novoshytskyi, Svitlana Bodu, Dmytro Fabritsyiev, Mykhailo Hrynyk

Manufacturing of thin-walled flat parts of heat exchangers with spherical protrusions and recesses

A technology for manufacturing thin-walled flat parts of heat exchangers with relief in the form of spherical protrusions and recesses is proposed. Forming is carried out by local profiling of the staff under the action of longitudinal tension using rollers with the appropriate relief. It has been established that the longitudinal tensile force significantly affects the stability of the shape, preventing waviness near the spherical elements and at the edges of the workpiece. The developed technology provides increased manufacturing accuracy and can be adapted to serial production.

Keywords: heat exchangers; profiling; longitudinal tension; spherical protrusions; heat transfer intensification.

УДК 629.5.03:620.92

ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНИХ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У СУДНОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ**Б. Т. Діасамідзе¹, О. Л. Кісаров-Дагнер², А. М. Зайцев²,**

¹PhD, викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна;

²здобувач освіти гр. 3291 кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

Анотація. У роботі проаналізовано сучасний стан, ключові проблеми та перспективи впровадження альтернативних і гібридних енергетичних рішень для декарбонізації морського транспорту. Визначено критичний вплив судноплавства на глобальні викиди CO₂ та NO_x і розглянуто стратегічні цілі ІМО та ЄС щодо зниження інтенсивності викидів. Детально проаналізовано потенціал водневих технологій (зокрема, аміаку та LNG), їхні економічні та інфраструктурні обмеження. Обґрунтовано роль біопалив (HVO, біометан) як важливих перехідних рішень. Показано необхідність застосування гібридних систем та енергоефективних технологій (вітрової допомоги) для оптимізації роботи двигунів. Зроблено висновок про те, що успіх декарбонізації залежить від комплексної стратегії, яка поєднує технологічні інновації та потужні регуляторні механізми (такі, як FuelEU Maritime).

Ключові слова: судноплавство, декарбонізація, альтернативні палива, водень, аміак, біопаливо, гібридні енергетичні системи, викиди парникових газів.

Вступ. Морський транспорт є критично важливим для світової торгівлі, забезпечуючи перевезення близько 70–90 % усіх вантажів. Однак його вплив на довкілля залишається суттєвою проблемою [1]. Судноплавство генерує приблизно 3 % глобальних викидів CO₂, а також до 13–15% антропогенних викидів оксидів сірки (SO_x) та азоту (NO_x) [1]. Ситуація погіршується: викиди від міжнародного судноплавства продовжують зростати, і якщо не вжити заходів, його частка у глобальних викидах CO₂ може сягнути ~17 % до 2050 року [2]. Крім глобального потепління, викиди суден також спричиняють локальне забруднення повітря у припортових зонах, що прямо впливає на здоров'я населення та екологію [2]. У відповідь на цей виклик міжнародна спільнота активізувалася. Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла стратегію, яка ставить амбітну мету: скоротити викиди CO₂ від судноплавства на 50 % до 2050 р. (порівняно з 2008 р.) та в кінцевій перспективі – досягти повної декарбонізації до кінця століття [3, 4]. Європейський Союз пішов далі, включивши морський сектор до Системи торгівлі викидами (EU ETS) із чітким графіком зниження інтенсивності викидів. Такі амбітні цілі, підтверджені галузевими прогнозами до 2050 року [5], вимагають негайного переходу від

традиційного нафтового палива (мазуту, дизелю) до інноваційних альтернативних джерел та масового впровадження енергоефективних рішень.

Постановка задачі. Сьогодні науковці та інженери активно шукають низьковуглецеві рішення для суднової енергетики [1]. Серед найперспективніших альтернатив розглядають зріджений природний газ (ЗПГ, LNG), а також водень, аміак, метанол, різні види біопалива, синтетичні вуглеводні, акумуляторні батареї та використання відновлюваних джерел (сонячні панелі, вітрильні установки) [1]. Паралельно розвиваються гібридні енергетичні установки – комбіновані системи, що поєднують дизельні двигуни з електричними батареями або паливними елементами. Гібридизація дозволяє значно оптимізувати роботу двигунів, використовуючи електротягу в портах і рекуперуючи енергію, що прямо веде до економії палива та зменшення викидів. Наприклад, впровадження літій-іонних батарей на поромних маршрутах вже довело свою ефективність, знижуючи споживання пального під час маневрів і стоянок [6]. Повністю електричні судна поки що обмежені короткими відстанями, але вдосконалення технологій батарей (збільшення щільності, зниження ціни) обіцяє розширити сферу їх застосування [6]. Важливо визнати: немає єдиного "чарівного" рішення, яке б могло повністю замінити нафтове паливо у всіх сегментах морського транспорту [2]. Кожне альтернативне джерело має свої унікальні переваги, недоліки та економічні обмеження. Саме тому сьогодні на часі глибокий, комплексний аналіз стану впровадження цих технологій, оцінка пов'язаних проблем і прогнозування перспектив їхнього розвитку.

Водневі технології у судновій енергетиці. Водень вважається одним із найбільш багатообіцяючих альтернативних енергоносіїв для морської галузі [1, 7]. Його головна перевага – повна відсутність викидів CO₂ під час використання: процес окиснення водню генерує лише водяну пару, а NO_x утворюються лише у незначній кількості при високих температурах горіння [1]. Водневі паливні елементи вражають високим ККД (~50–60 %, до 80 % в ідеальних умовах), що значно перевищує показники традиційних дизельних установок [1]. Технологія вже вийшла з лабораторій: створено прототипи й невеликі комерційні судна (катери, буксири, пороми). Станом на кінець 2024 р. у світі вже було збудовано або переобладнано близько 50 суден на водневій енергетичній установці [8], що є чітким доказом технічної здійсненності цієї ідеї.

Проте, широке впровадження водню стикається з низкою **значних технічних та економічних перешкод**:

- **Зберігання:** Водень має дуже низьку об'ємну енергетичну щільність. Навіть у зрідженому стані (H₂ при –253 °C) його щільність утричі менша за мазут, що вимагає використання великих та громіздких ізотермічних танків, зменшуючи корисний простір судна [8].
- **Економіка:** Виробництво «зеленого» водню (через електроліз) наразі є надзвичайно дорогим. Його собівартість значно перевищує ціну традиційного палива [1], хоча здешевлення відновлювальних джерел енергії дає надію на зниження вартості водню у майбутньому [9].

- **Інфраструктура:** У портах практично відсутня розвинена мережа бункерування стисненого або рідкого водню [1, 10].

- **Безпека:** Водень є надзвичайно летючим і легкозаймистим, що вимагає дуже ретельного дотримання норм безпеки: спеціальної вентиляції, вибухозахищеного обладнання та чітких регуляторних правил, які класифікаційні товариства лише починають розробляти [8].

Цікавою альтернативою прямому водню є **аміак (NH_3)** – водневмісне паливо, що не містить вуглецю. Аміак розглядається як **перспективний носій енергії для далеких маршрутів**. Він зберігається при значно вищій температурі ($-33\text{ }^\circ\text{C}$), має кращу об’ємну енергоємність і вже широко використовується в промисловості [11]. Прогнози вказують, що аміак може стати одним із головних видів палива для майбутнього декарбонізованого флоту [11]. Його спалювання не призводить до викидів CO_2 , але слід враховувати, що утворюються NO_x , а сам аміак є **токсичним і корозійним**. Проблеми, як і у водню: відсутність серійних двигунів, необхідність створення бункерувальної інфраструктури та суворих протоколів безпеки. Незважаючи на це, провідні виробники (MAN, Wärtsilä) активно розробляють аміачні двигуни, і судноплавні компанії вже замовляють відповідні судна.

Отже, водень та його похідні (насамперед, «зелений» аміак) є **стратегічною ставкою** на повну декарбонізацію, але вимагають прориву в технологіях та інвестиційну підтримку для подолання поточних бар’єрів [8].

Біопаливо для морського транспорту. Біопаливо пропонує **реалістичний шлях** для часткового переходу до альтернативних джерел. Його головна перевага полягає у **вуглецево-нейтральному циклі**: CO_2 , виділений при згорянні, був раніше поглинутий біомасою з атмосфери. Це означає, що за умови стійкого виробництва чисті викиди парникових газів значно нижчі, ніж у викопних палив [12].

Найбільш практичні види біопалива для морського транспорту:

- **Біодизель (FAME):** Отриманий з рослинних олій. Завдяки фізико-хімічній подібності до дизельного палива він може змішуватися або використовуватися самостійно в існуючих двигунах з мінімальною модернізацією. Біодизель знижує викиди CO_2 (на 50–90 %) та майже повністю усуває SO_x [2]. Обмеження: нестача стійкої сировини та проблеми з холодостійкістю.

- **Гідроочищена рослинна олія (HVO):** Відновлюваний дизель, який за якістю перевершує FAME. Це майже ідеальне drop-in паливо, що повністю відповідає дизельним стандартам і може використовуватися без жодних модифікацій двигуна. HVO забезпечує скорочення парникових газів до 70–90 % [12]. Проблема: критичний дефіцит сировини, такої як відпрацьовані олії та жири.

- **Біогаз/біометан (bio-LNG):** Зріджений біометан хімічно ідентичний викопному LNG, що дозволяє використовувати його в існуючій інфраструктурі без змін. За умови виробництва з відходів, він може забезпечити скорочення парникових газів понад 70 % порівняно

з мазутом [12]. Виклик: забезпечення достатніх обсягів виробництва біометану для транспортного сектора.

Комплексний аналіз демонструє, що **біометан, біодизель та HVO** є найбільш доцільними для впровадження у коротко- та середньостроковій перспективі [12]. Біопаливо забезпечує **суттєве зниження парникових газів (понад 70 %)**, але його ефективність прямо залежить від походження сировини (використання відходів є найбільш вигідним) [12].

Біопаливо є **важливим елементом перехідної стратегії**, дозволяючи зменшити викиди без кардинальної заміни флоту. Однак, обмеженість стійкої біосировини означає, що біопаливо не зможе декарбонізувати галузь самотужки.

Інші альтернативні палива та гібридні рішення. Крім біопалив і водню, галузь розглядає інші перспективні рішення:

- **Зріджений природний газ (LNG):** Став одним із перших кроків до "чистішого" палива. Перехід на LNG практично усуває викиди SOx, зменшує NOx та скорочує CO2 на ~20–25 % [2]. Однак, LNG залишається викопним паливом, генерує CO2, а його використання пов'язане з проблемою метанових викидів (сильний парниковий газ). Тому LNG розглядається як тимчасове або проміжне рішення [11]. Його ключова роль у майбутньому – слугувати платформою для переходу на відновлюваний біометан.

- **Метанол (CH₃OH):** Привабливий тим, що є рідким при нормальних умовах, що значно спрощує зберігання, бункерування та інтеграцію. Метанол вже успішно використовується на комерційних судах (наприклад, серії контейнеровозів Maersk). Він значно знижує викиди токсичних речовин: SOx на 99 %, твердих часток на 95 % [2]. Ключове завдання – забезпечити виробництво «зеленого» метанолу (з водню та уловленого CO2 або біомаси), оскільки метанол, вироблений із викопної сировини, не вирішує проблему парникових газів повною мірою [2].

Аналіз життєвого циклу різних палив підтверджує критичну тезу: **екологічна ефективність залежить від способу їх виробництва**. Навіть такі чисті на борту палива, як водень чи аміак, якщо вони вироблені з викопної сировини, мають сумарний вуглецевий слід, співставний із мазутом. Тільки палива, виготовлені на основі **відновлюваних джерел**, забезпечують необхідне скорочення **парникових газів (більше 70 %)** [2].

Гібридні та Енергоефективні Рішення

- **Гібридні системи:** дизель-електричні установки, доповнені акумуляторами, дозволяють генерувати енергію в оптимальному режимі та використовувати батареї для покриття пікових навантажень або руху на низьких швидкостях. Це може забезпечити економію пального до ~20 % і більше, особливо у портових зонах [6].

- **Вітрова енергія:** сучасні допоміжні вітрові установки (ротори Флеттнера, тверді вітрила) можуть скоротити витрату палива на 5–20 % залежно від маршруту [13].

- **Електрифікація:** постійний розвиток технологій батарей розширює можливості повністю електричних суден, особливо на коротких і середніх маршрутах.

Успіх усіх інновацій **тісно пов'язаний з економікою та політикою**. Оскільки альтернативні палива поки що дорогіші, потрібні потужні **стимули** – квотування, податкові пільги, і, найголовніше, ****підвищення ціни на викиди CO₂ через механізми на кшталт EU ETS** [4]. Саме довгострокова політична підтримка та масштабування виробництва можуть зробити «зелений» водень, аміак та метанол конкурентоспроможними.

Висновки

Декарбонізація морського транспорту – це **комплексний інженерний, економічний та політичний проєкт**, для успіху якого необхідне поєднання кількох стратегій.

1. **Стратегічна лінія:** Водень та аміак мають найбільший потенціал для досягнення **нульових викидів**. Їхнє впровадження залежить від проривів у технологіях зберігання, зниження вартості «зеленого» **виробництва** та створення глобальної безпечної інфраструктури.

2. **Перехідний міст:** Біопаливо (HVO, біометан, біодизель) і зелений метанол є **доступними сьогодні рішеннями** для швидкого скорочення **парникових газів** без значної зміни флоту [12]. Метанол, як рідке паливо, стає все більш популярним серед великих перевізників.

3. **Підвищення ефективності:** Гібридні системи та вітрова допомога **доповнюють картину**, забезпечуючи економію палива та зниження викидів на операційному рівні [6], [13].

4. **Визначальний фактор:** Ключ до успіху – це **декарбонізація джерел енергії для виробництва палива** та наявність сильних регуляторних механізмів, таких як FuelEU Maritime [14], які роблять чисті технології економічно вигідними [15].

Перехід до екологічно чистого світового флоту є незворотним процесом. Наукові дослідження та пілотні проєкти вже створили міцну базу для поступового впровадження цих рішень. У найближче десятиліття очікується **інтенсивний розвиток** цих технологій, що прокладе шлях до кінцевої мети: створення **енергоефективного та екологічно чистого морського транспорту**.

Література:

- [1]. Кірсанова В. В., Биковець Н. П., Бражник І. Д. (2023). Зелений водень як спосіб декарбонізації судноплавства. *Наук. журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»*, 2/2(70), 125–131. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/22>
- [2]. Wang Y., Wright L. (2021). A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. *World*, 2(4), 456–481. <https://doi.org/10.3390/world2040029>
- [3]. IMO. (2018). *Initial IMO GHG Strategy* (MEPC 304(72)). International Maritime Organization.
- [4]. Balcombe P., Brierley J., Lewis C., et al. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, 182, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- [5]. DNV. (2022). *Maritime Forecast to 2050* (Edition 2022). Høvik, Norway: DNV AS.
- [6]. Wang H., Li M., Qian F., Xu W. (2024). Challenges and Solutions of Ship Power System Electrification. *Energies*, 17(13), 3311. <https://doi.org/10.3390/en17133311>
- [7]. Alavi-Borazjani S. A., Adeel S., Chkoniya V. (2025). Hydrogen as a Sustainable Fuel: Transforming Maritime Logistics. *Energies*, 18(5), 1231. <https://doi.org/10.3390/en18051231>

- [8]. Fan H., Abdussamie N., Chen P. S.-L., et al. (2025). Two decades of hydrogen-powered ships (2000–2024): Evolution, challenges, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 219, 115878. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115878>
- [9]. International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Hydrogen*. Paris.
- [10]. Van Hoecke L., Laffineur L., Campe R., et al. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, 14(2), 815–843. <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
- [11]. Machaj K., Kupecki J., Malecha Z., et al. (2022). Ammonia as a potential marine fuel: A review. *Energy Strategy Reviews*, 44, 100926. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100926>
- [12]. Желєзна Т., Драгнєв С. (2024). Аналіз перспектив використання біопалив на морському транспорті. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(6), 75–87. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240306.07>
- [13]. Lee D., Longva T., Nerdal S. (2019). *Potential of Wind-Assisted Propulsion for Shipping* (DNV-GL Report). Horizon 2020 Project WiSP.
- [14]. European Commission. (2023). FuelEU Maritime Regulation 2023/1805: Reducing the greenhouse gas intensity of maritime fuel. *Official Journal of the EU*, 19.07.2023.
- [15]. Bouman E. A., et al. (2017). State-of-the-Art Technologies, Measures, and Potential for Reducing GHG Emissions from Shipping. *Transportation Research D*, 52, 408–421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>

Application of hybrid and alternative energy sources in marine power engineering: state, challenges, and prospects

Diasamidze B. T., Kisarov-Dagner O. L., Zaitsev A. M.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Abstract. *The paper analyzes the current state, key challenges, and prospects for the implementation of alternative and hybrid energy solutions aimed at the decarbonization of the maritime transport sector. The critical impact of shipping on global CO₂ and NO_x emissions is outlined, and the strategic emission reduction goals set by IMO and the EU are considered. The potential of hydrogen technologies (including ammonia and LNG), their economic and infrastructural constraints are analyzed in detail. The role of biofuels (HVO, biomethane) as vital transitional solutions is justified. The necessity of adopting hybrid systems and energy-efficient technologies (wind assistance) for optimizing engine performance is demonstrated. It is concluded that the success of decarbonization hinges on a comprehensive strategy combining technological innovation and strong regulatory mechanisms (such as FuelEU Maritime).*

Keywords: shipping, decarbonization, alternative fuels, hydrogen, ammonia, biofuels, hybrid power systems, GHG emissions.

УДК 661.53:620.91

**РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ –
ПЕРСПЕКТИВНОГО ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ****О. А. Єпіфанов, PhD, доцент¹, П. А. Пацурковський, PhD, доцент²***Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова**Україна, м. Миколаїв**¹oleksandr.yepifanov@nuos.edu.ua, ²pavlo.patsurkovskiy@nuos.edu.ua*

Анотація. Розглянуто традиційні та перспективні технології виробництва аміаку. Вказано, що традиційна технологія Габера–Боша характеризується значними витратами енергії та викидами парникових газів. Показано, що перспективними є технологія виробництва «зеленого» аміаку з використанням відновлюваного водню, а також технологія електрохімічного відновлення N_2 до аміаку.

Ключові слова: технологія виробництва аміаку, парникові гази, аміак, декарбонізація.

Вступна частина. Значна частина викидів вуглекислого газу (CO_2) припадає на виробництво електроенергії та транспорт [1]. Ці сектори є головним винуватцем глобального потепління, підриваючи боротьбу зі зміною клімату. Найбільший абсолютний приріст викидів CO_2 у 2022 році був від виробництва електричної та теплової енергії [2]. При збільшенні глобального попиту на електроенергію на 2,7 % викиди в енергетичному секторі зросли на 1,8 % (або 261 Мт), досягнувши історичного максимуму в 14,6 Гт (рис. 1). Незважаючи на те, що значні зусилля були запроваджені для зменшення викидів парникових газів, наприклад, шляхом підвищення ефективності згоряння, цих зусиль недостатньо для досягнення низьких викидів парникових газів [3].

Декарбонізація енергетики, промисловості та транспорту призводить до поступового скорочення споживання вуглецю та його заміни іншими видами. Програмним документом, який враховує необхідність декарбонізації, є нова Енергетична стратегія України на період до 2050 року [4]. Майбутнє безвуглецевого виробництва електроенергії залежить, головним чином, від використання відновлюваних, низьковуглецевих або безвуглецевих видів палива [5]. Аміаку (NH_3) приділяється все більша увага як одному з найпривабливіших енергоносіїв через його безвуглецеву природу та створену надійну інфраструктуру для його транспортування, зберігання та розподілу. Спочатку аміак розглядався як носій і постачальник водневої енергії: в цьому контексті передбачається його розкладання на водень і азот в точці доставки [6]. В останні кілька років використання аміаку включає його безпосереднє використання в якості палива [3, 5, 6]. Переосмислення ролі аміаку, зокрема в енергетичному секторі, стало одним із світових трендів.

Це можна побачити зі стрімкого збільшення наукових публікацій, пов'язаних із спалюванням аміаку, після оглядової статті Hideaki Kobayashi та ін. [3].

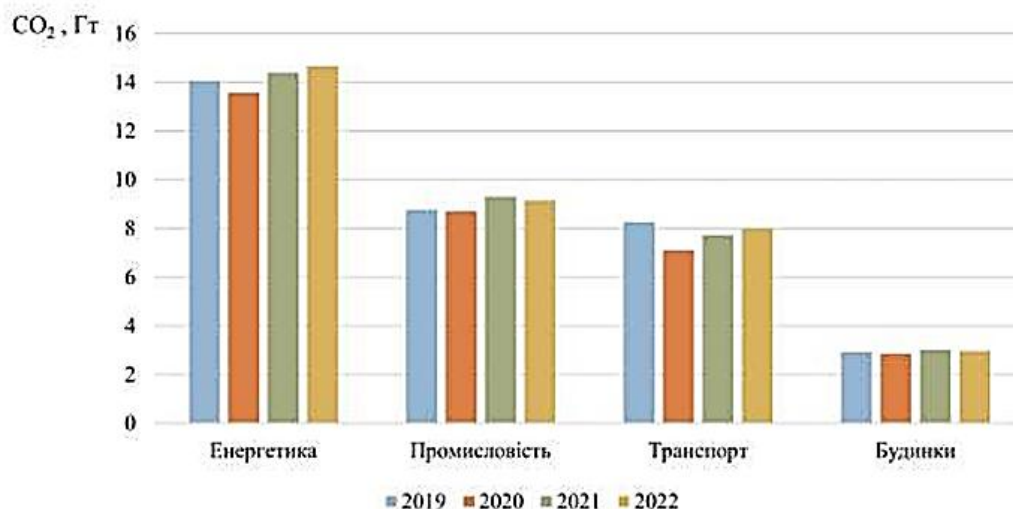


Рисунок 1 – Глобальні викиди CO₂ за секторами, 2019–2022 [8]

У 2018 році глобальні викиди парникових газів (ПГ) від судноплавства становили близько 3 % від загальних викидів. Прогнозується, що викиди міжнародного судноплавства збільшаться на 90...130 % від рівня 2008 року до 2050 року. У 2023 році Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла нову стратегію щодо ПГ, яка є переглядом початкової стратегії, прийнятої у 2018 році. Нові цілі спрямовані на скорочення щорічних викидів ПГ від світового судноплавства принаймні на 70 % до 2040 року порівняно з 2008 роком [7]. Переглянуті цілі ІМО посилюють тиск на судноплавні організації, щоб вони терміново скоротили споживання енергії та відмовилися від викопного палива. Хоча існує кілька альтернативних варіантів палива для судноплавства, аміак є помітним претендентом.

Ціль роботи – аналіз розвитку традиційних та перспективних технологій виробництва аміаку, як альтернативного палива для суднової енергетики.

Основна частина. Традиційне виробництво аміаку включає капіталомісткий та енергоємний процес Габера–Боша, який зазвичай використовує викопне паливо (рис. 2). У цьому процесі азот (N₂) та водень (H₂) стискаються разом під тиском 10...20 МПа та температурою від 400 °С до 500 °С у реакторі. Залізний (Fe) каталізатор сприяє вивільненню атомів азоту, які потім реагують з атомами водню, утворюючи аміак. Традиційне виробництво аміаку відповідає приблизно за 1,8 % світових антропогенних викидів CO₂ щорічно та споживає 1...2 % світової енергії. При цьому виробництво водню шляхом парового риформінгу метану (SMR) використовує 80 % цієї енергії.

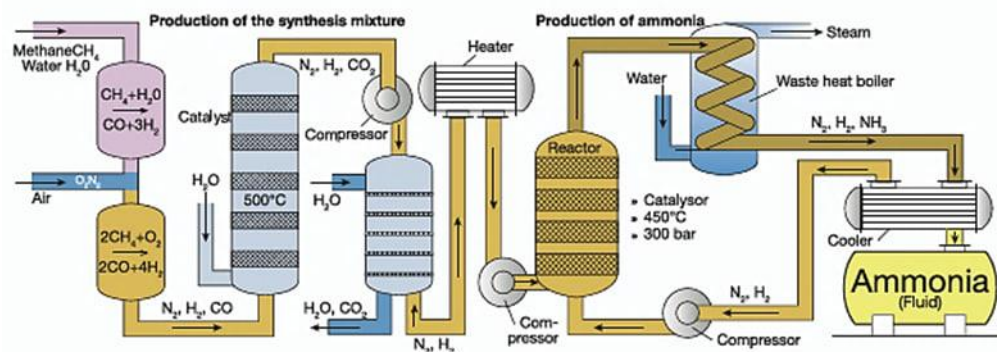


Рисунок 2 – Технологічна схема традиційного процесу Габера–Боша [5]

Зараз компанії інвестують в розвиток традиційної технології першого покоління виробництва аміаку, яке передбачає додавання до процесу Габера–Боша установки для видалення вуглекислого газу. Це дозволяє видаляти до 90 % CO_2 , отримуючи «блакитний» аміак (рис. 3). Аспект секвестрації вуглецю у виробництві «блакитного» аміаку додає вартості до існуючої технології Габера–Боша. Отже це, ймовірно, буде лише перехідним рішенням, що допоможе створити ринок аміаку як альтернативного палива за межами виробництва добрив та хімічної промисловості.

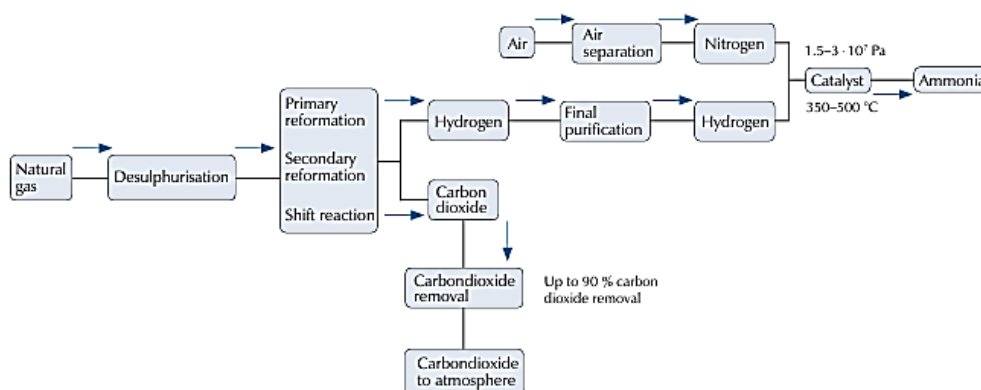


Рисунок 3 – Технологічна схема отримання «блакитного» аміаку [9]

«Зелений» аміак другого технологічного покоління виробляється за технологією Габера–Боша, але з використанням відновлюваного водню, а не викопного палива. Це має перевагу в тому, що існуючі установки Габера–Боша можна перевести на це нове джерело водню без значних витрат. У процесі виробництва «зеленого» аміаку екологічно чиста енергія виробляється за допомогою відновлюваних ресурсів, таких як сонячна енергія та повітря. Водень, який використовується в процесі виробництва «зеленого» аміаку, генерується в процесі електролізу води, а потім поєднується з атмосферним азотом (рис. 4).

Технологія другого покоління має значний потенціал з точки зору аміачної економіки, обмежений лише значними інвестиціями та тривалим часом, необхідним для створення нових потужностей. Окрім вартості звичайної установки Габера–Боша, капітальні витрати також

включають обладнання для електролізу води, яке наразі становить близько 1 млн доларів США на МВт потужності. Вплив цих капітальних витрат вказує на те, що вони можуть значно збільшити капіталомісткість виробництва аміаку. Це привертає увагу до дослідницьких та розробницьких зусиль, спрямованих на зниження вартості електролізерів [7].

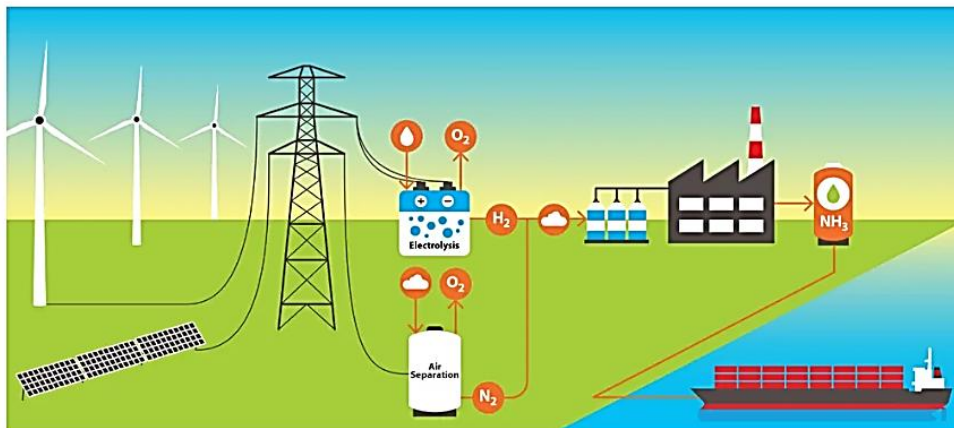


Рисунок 4 – Виробництво «зеленого» аміаку [6]

Технологія електрохімічного розщеплення води – лужний електроліз – має обмежений потенціал для значного зниження витрат. На противагу цьому, електролізери води з протонобмінною мембраною (proton exchange membrane) є більш популярними головним чином завдяки вищим щільностям струму. Ця технологія пропонує кілька варіантів для значного зниження витрат. Цікавою альтернативою для виробництва аміаку другого покоління є високотемпературний твердооксидний електроліз (solid oxide electrolysis), який може використовувати відхідну теплоту установки Габера-Боша. Цей процес з прогнозованою загальною енергоефективністю для виробництва аміаку понад 70 % зараз розробляється [6].

І водень, і аміак є потенційно відновлюваними паливами, які відіграватимуть важливу роль для декарбонізації таких галузей, як виробництво добрив, металургія, морські перевезення (суднове паливо), розробка корисних копалин (високо габаритна техніка кар'єрного типу) та інші. Однак, витрати на виробництво «зеленого» аміаку залишаються непомірно високими для широкого впровадження. Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) оцінює витрати на виробництво однієї тонни аміаку із «зеленого» водню до 1400 дол, тоді як аміак, отриманий через використання природного газу, коштує до 340 дол. Втім через удосконалення технологій і внаслідок падіння виробничих витрат при виробництві саме «зеленого» водню аміак може стати альтернативою як низьковуглецеве паливо майбутнього [6].

Технологія третього покоління стосується електровідновлення N_2 до аміаку прямим або опосередкованим способом. Процес Габера-Боша більше не потрібен на цьому рівні технології. Натомість реакція здійснюється за допомогою електрохімічного відновлення, а джерелом H_2 є вода. Активно досліджується кілька режимів цього процесу: (1) електрохімічна реакція

відновлення азоту, в якій електрокаталізатор забезпечує пряме приєднання електронів і протонів до молекули N_2 (рис. 5, *a*) та (2) непрямі або опосередковані механізми, в яких спочатку відновлюється окисно-відновний медіатор, такий як Li, а потім, через серію реакцій, утворюється аміак, і медіатор регенерується (рис. 5, *b*) [6].

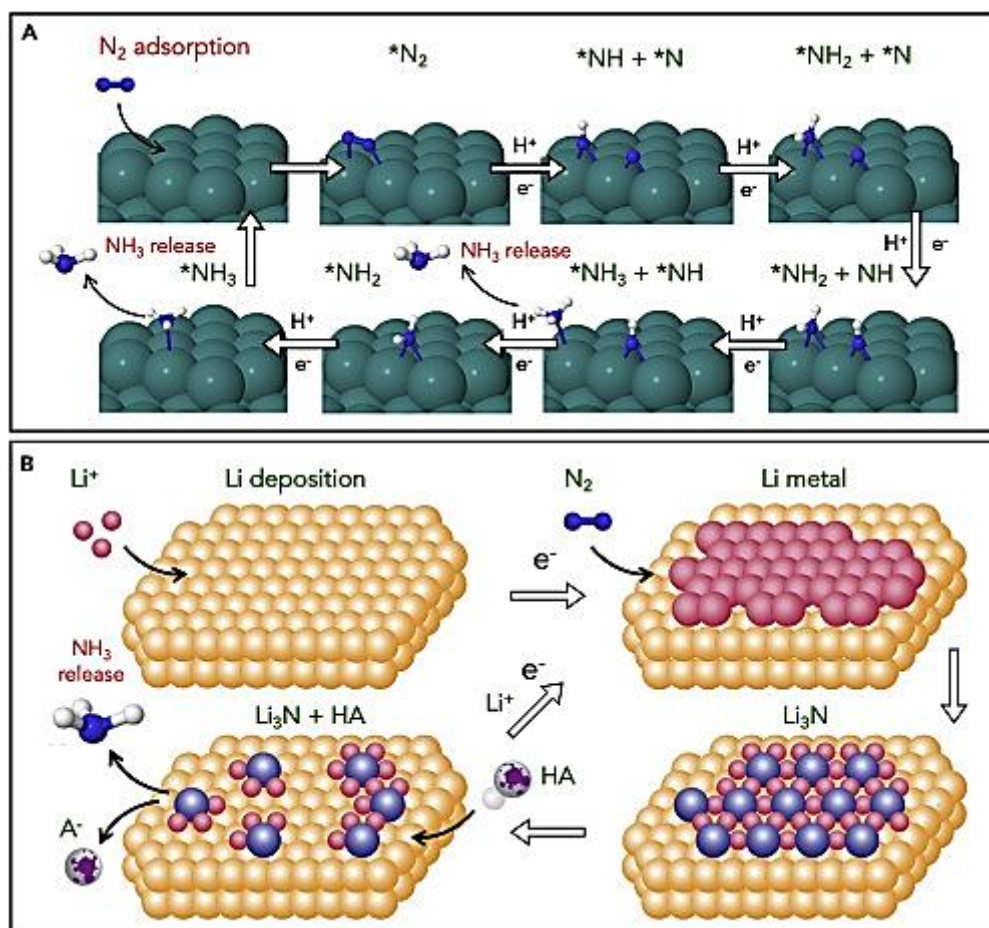


Рисунок 5 – Механізми прямого відновлення азоту до аміаку (*a*, *b*) [6]

Висновки. 1. Проаналізовано традиційні та перспективні технології виробництва аміаку, як потенційного безвуглецевого палива для суднової енергетики. 2. Показано, що подальший розвиток традиційної технології першого покоління Габера–Боша передбачає отримання «блакитного» аміаку при значному до 90 % скороченні викидів вуглекислого газу. 3. Показано, що перспективною є технологія отримання «зеленого» аміаку другого покоління з використанням водню, який генерується в процесі електролізу води. При цьому необхідна енергія виробляється за допомогою відновлюваних ресурсів, таких як сонячна енергія та повітря. 4. Показано, що технологія третього покоління стосується електровідновлення N_2 до аміаку прямим або опосередкованим способом. Процес Габера–Боша більше не потрібен на цьому рівні технології.

Список літератури

- [1] Data and statistics – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/country>.
- [2] CO₂ Emissions in 2022 – Analysis – IEA. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [3] Science and technology of ammonia combustion / Н. Kobayashi та ін. Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Т. 37, № 1. С. 109–133. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029>.

[4] Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023p>.

[5] A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies / N. Morlanés та ін. Chemical Engineering Journal. 2020. С. 127310. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127310>.

[6] A Roadmap to the Ammonia Economy / D. R. MacFarlane та ін. Joule. 2020. Т. 4, № 6. С. 1186–1205. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.04.004>.

[7] Abhilasha Fullonton, Amanda R. Lea-Langton, Fatima Madugu, Alice Larkin. Green ammonia adoption in shipping: Opportunities and challenges across the fuel supply chain. Marine Policy, vol. (171), January 2025, 106444. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106444>.

[8] І.О. Шахбазов, О.А. Сірий. Використання аміачного палива як захід зі зниження парникових газів. ВИКОРИСТАННЯ. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 4. с. 142-148. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2024.315597>.

[9] A. O. GEZERMANN. A Critical Assessment of Green Ammonia Production and Ammonia Production Technologies. Kem. Ind. 71 (1-2) (2022) 57–66. <https://doi.org/10.15255/KUI.2021.013>.

Yepifanov O. A., Patsurkovskyi P.A.

DEVELOPMENT OF AMMONIA PRODUCTION TECHNOLOGIES – A PROSPECTIVE FUEL FOR MARINE POWER

Traditional and promising technologies for ammonia production are considered. It is indicated that the traditional Haber-Bosch technology is characterized by significant energy consumption and greenhouse gas emissions. It is shown that the technology for producing "green" ammonia using renewable hydrogen, as well as the technology for electrochemical reduction of N₂ to ammonia, are promising.

Keywords: ammonia production technology, greenhouse gases, ammonia, decarbonization.

УДК 621.43

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Сагін С. В., д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри;

Куropyтник О. А., PhD, докторант,

Національний університет «Одеська морська академія»,

Україна, м. Одеса

saginsergii@gmail.com, kuropyatnyk83@gmail.com

Анотація. *Висвітлені особливості систем рециркуляції випускних газів високого тиску, що встановлюються на суднових малообертових дизелях високої потужності. Наведені результати досліджень, що виконувались на судовому малооберттовому дизелі 8G60ME MAN Diesel, обладнаного системою рециркуляції випускних газів високого тиску. Експериментально встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах відповідно на 3,8...30,7 % залежно від навантаження дизеля..*

Ключові слова: *екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, система рециркуляції випускних газів високого тиску, судовий дизель.*

Вступна частина. Двигуни внутрішнього згоряння/дизелі займають в суднової енергетики домінуюче положення в порівнянні з іншими типами теплових двигунів – паровими котлами та газовими турбінами. Перш за все це пов'язано з найменшою питомою витратою палива та найбільшим коефіцієнтом корисної дії, що характерні саме для дизелів [1–3]. Дизелі, що встановлюються на судах морського та внутрішнього водного транспорту, виконують функції головних та допоміжних двигунів, забезпечуючи рух судна та роботу суднових систем, механізмів та обладнання. Отримання корисної роботи та ефективної потужності в суднових дизелях неможливо без спалювання в їхніх циліндрах рідкого палива нафтового походження. При цьому в результаті його згоряння в атмосферу викидаються випускні гази. Більшу частину випускних газів (до 99,0...99,2 %) складають нейтральні та нетоксичні компоненти – продукти неповного згоряння (більшою частиною яких є діоксид вуглецю CO_2 і водяна пара H_2O) та повітря зі зниженим вмістом кисню. Невелику решту зі загальної частини випускних газів складають токсичні компоненти, які поділяються на дві групи. До першої групи відносяться продукти неповного згоряння палива – монооксид вуглецю CO , вуглеводні C_nH_m , альдегіди R-CHO та сажа C . Токсичні компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива та повітря – це оксиди азоту NO_x та сірки SO_x [4–6].

Вміст оксидів азоту в випускних газах регламентується вимогами Annex VI Міжнародної конвенції MARPOL та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля (табл. 1) [7–9].

Таблиця 1 – Максимальна концентрація оксидів азоту (NO_x , г/кВт·год) в випускних газах суднових дизелів відповідно до вимог Annex VI MARPOL

Рівень	Частоти обертання валу, об/хв		
	$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n > 2000$
Tier I – для суден, збудованих після 2000 р.	17,0	$45n^{-0,2}$	9,8
Tier II – для суден, збудованих після 2011 р.	14,4	$44n^{-0,23}$	7,7
Tier III – для суден, збудованих після 2016 р.	3,4	$9n^{-0,2}$	2,0

Забезпечення вимог Tier I, Tier II можливо шляхом додаткової підготовки палива (наприклад, його гомогенізації, ультразвукової обробки та виготовлення водопаливних емульсій) та вдосконаленням робочого циклу (наприклад, управління фазами подачі повітря, випуску газів та впорскування палива). Забезпечення вимог Tier III можливо лише через використання додаткових технічних систем та пристроїв. Найбільш розповсюдженими з них є: система очищення випускних газів – Selective Catalytic Reduction (SCR); системи рециркуляції – Exhaust Gas Recirculation (EGR); система перепуску – Exhaust Gas Wastegate (EWR) [10–12].

Ціль роботи – визначення впливу системи рециркуляції випускних газів високого тиску на основні експлуатаційні показники роботи судових дизелів.

Основна частина. Дослідження виконувались на судовому малообертовому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel, обладнаному системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel надана на рис. 1.

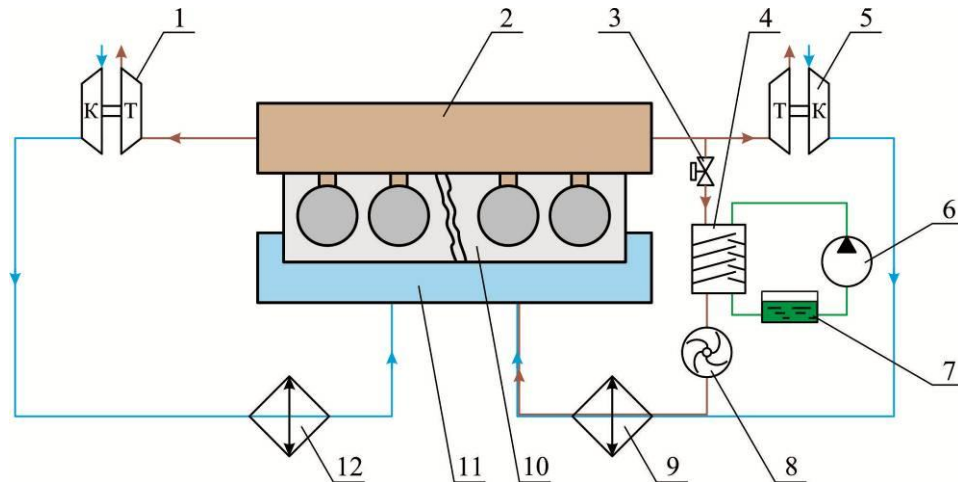


Рисунок 1 – Принципова схема системи рециркуляції випускних газів високого тиску судового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel:

1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів високого тиску; 4 – скрубер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів;

7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів; 9, 12 – охолоджувач наддувного повітря; 10 – судовий дизель; 11 – продувний ресивер; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Система працює в такий спосіб. Випускні гази з циліндрів дизеля 10 надходять у загальний випускний колектор 2 і далі до газотурбонагнетачів 1 і 5, після чого через газовипускную трубу видаляються в атмосферу. Газотурбонагнітачі 1 і 5 забирають повітря з машинного відділення та після стиснення спрямовують його через охолоджувачі 9 і 12 в повітряний (продувний) ресивер 11. При цьому газотурбонагнітач 5 обладнаний системою рециркуляції випускних газів високого тиску, до складу якої входять керуючий клапан 3, скрубер очищення газів 4, цистерна 7 прісної води системи очищення та охолодження випускних газів та насос 6 подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів.

Під час експлуатації системи рециркуляції випускних газів високого тиску їх кількість, що повертається через систему очищення до продувного ресиверу та циліндрів дизеля, регулюється клапаном 3. Випускні гази очищуються і попередньо охолоджуються в скрубері 4,

після чого додатковим нагнітачем 8 подаються на змішування з повітрям (що надходить з повітряного компресору газотурбонагнітувача 5) і далі прямують до продувного ресиверу 11.

Основною метою дослідження було визначення впливу системи HP-EGR на екологічні показники роботи суднового дизеля 8G60ME MAN Diesel, зокрема – на рівень емісії оксидів азоту NO_x .

Концентрація оксидів азоту вимірювалась в газовипускній магістралі дизеля на відстані, що перебільшувала 10 м від виходу газів з газотурбонагнітача, що відповідало вимогам Технічного кодексу з NO_x . Вимірювання виконувались на режимах, що відповідали 60 %, 70 %, 80 % та 90 % від номінального навантаження. При цьому на кожному з режимах ступень рециркуляції поступово змінювався та складав 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. На кожному з режимів дослідження починались з вимірювання концентрації NO_x за умовою роботи дизеля без використання системи HP-EGR ($\text{EGR}=0\%$). Результати досліджень відображені на рис. 2.

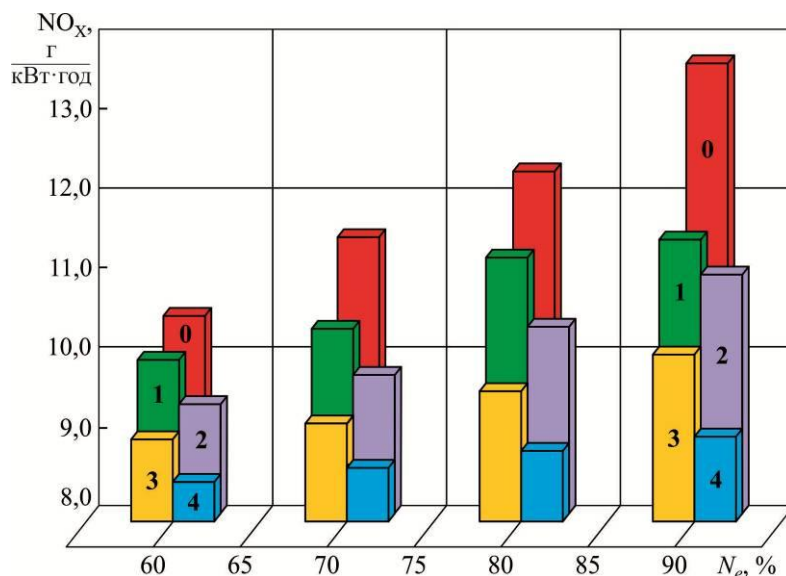


Рисунок 2 – Зміна концентрації оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), у випускних газах дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:

0 – робота без рециркуляції, $\text{EGR}=0\%$; 1 – $\text{EGR}=5\%$; 2 – $\text{EGR}=10\%$;

3 – $\text{EGR}=15\%$; 4 – $\text{EGR}=20\%$

Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x на кожному з режимів визначалось за виразом

$$\Delta \text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^0 - \text{NO}_x^i}{\text{NO}_x^0} \cdot 100, \%,$$

де NO_x^0 – концентрація оксидів азоту в випадку, коли $\text{EGR}=0\%$;

NO_x^i – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеню рециркуляції EGR (5 %, 10 %, 15 %, 20 %).

Відносне зменшення емісії оксидів азоту з випускними газами під час використання системи HP-EGR надано на рис. 3.

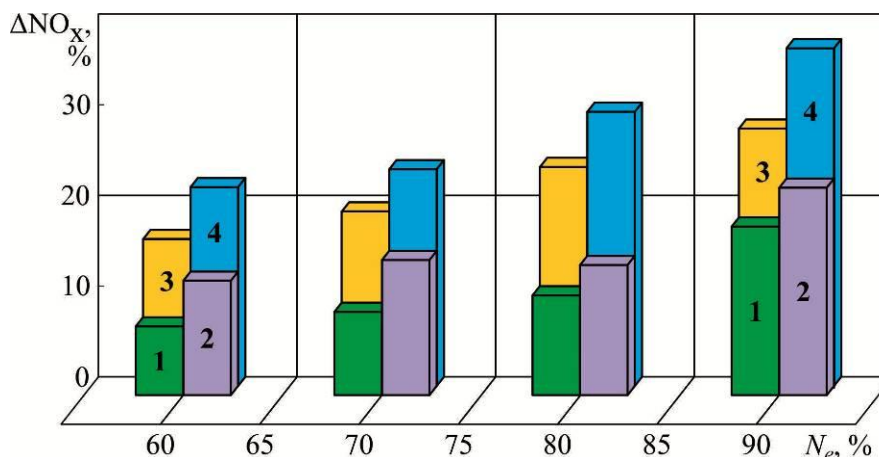


Рисунок 3 – Відносне зменшення емісії оксидів азоту NO_x з випускними газами дизеля 8G60ME MAN Diesel для різного ступеня рециркуляції:
1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

Висновки. Під час проведення експериментів на судновому малооборотовому дизелю 8G60ME MAN Diesel встановлено, що зміна ступеня рециркуляції випускних газів у діапазоні 5...20 % забезпечує зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідно на 5,4...35,5 % залежно від навантаження дизеля, яке в експериментах змінювалися в інтервалі $N_e=(0,6...0,9)N_{\text{ном}}$. Причому найбільші значення зниження концентрації оксидів азоту NO_x у випускних газах відповідають інтервалу навантажень $(0,8...0,9)N_{\text{ном}}$, тобто, найпоширенішим з експлуатаційних режимів роботи дизелів, що використовуються як головні.

Список літератури

- [1] Holovan, A., Gritsuk, I., Verbovskiy, V., Kalchenko, V., Grytsuk, Y., Verbovskiy, O., Dotsenko, S., Lysykh, A., Symonenko, R., Subochev, O. (2025). Algorithmic support and efficiency analysis of comprehensive prescriptive maintenance for cargo ships using predictive monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 135(3), 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331875>.
- [2] Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (64)), 34–41. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
- [3] Sagin, S. V., Kuropyatnyk, O. A., Zablotskiy, Y. V., Gaichenia, O. V. (2022). Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters. *Naše More*, 69(1), 53–61. <https://doi.org/10.17818/nm/2022/1.7>.
- [4] Budashko, V., Shevchenko, V. (2021). Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(110), 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

- [5] Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A. et al. (2025). Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
- [6] Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
- [7] Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. (2023). Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems*, 41, 96–106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>
- [8] Kuropyatnyk, O. A., Sagin, S. V. (2019). Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NO_x Emissions from Marine Diesel Engines. *Naše More*, 66 (1), 1–9. <https://doi.org/10.17818/nm/2019/1.1>
- [9] Minchev, D. S., Varbanets, R. A., Alexandrovskaya, N. I., & Pisintsaly, L. V. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*, 61(3), 435–447. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>.
- [10] Melnyk, O., Bulgakov, M., Fomin, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Pulyaev, I. (2025). Sustainable development of renewable energy in shipping: technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 127, 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
- [11] Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Lohinov, O., Maulevych, V., Kucherenko, V. (2025). Methods of Scale Control in Seawater Desalination Plants and Improving the Performance of Shipboard Equipment of Merchant Ships. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 596. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90462-2_21.
- [12] Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(64)), 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A.

Determining the impact of exhaust gas recirculation on the performance of marine diesel engines

The features of high-pressure exhaust gas recirculation systems installed on high-power low-speed marine diesel engines are highlighted. The results of research carried out on the low-speed marine diesel engine 8G60ME MAN Diesel, equipped with a high-pressure exhaust gas recirculation system, are presented. It was experimentally established that changing the degree of exhaust gas recirculation in the range of 5...20 % provides a reduction in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases by 3.8...30.7 %, respectively, depending on the load of the diesel engine.

Keywords: environmental indicators, nitrogen oxide emissions, maritime transport, high-pressure exhaust gas recirculation system, marine diesel

УДК 621.436

**ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА КЛАСУ HVO ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКОЛОГІЧНОСТІ РОБОТИ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ***Куropyтник О. А., PhD, докторант,**Національний університет «Одеська морська академія»,**Україна, м. Одеса**kuropyatnyk83@gmail.com*

Анотація. Розглянута можливість забезпечення екологічності морських суден шляхом використання як палива в суднових дизелях гідрованого рослинного мастила (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO). Аналіз екологічності роботи судна виконувався за економічними (питомою витратою палива) та екологічними (емісією оксидів азоту та оксиду вуглецю) показниками роботи дизелів. Експериментально визначено найбільш раціональні режими експлуатації дизелів з використанням палива HVO, які сприяють підвищенню екологічності роботи морського судна.

Ключові слова: гідроване рослинне мастило, екологічність роботи морського судна, емісія оксидів азоту, емісія оксидів вуглецю

Вступна частина. Морський та внутрішній водний транспорт є суттєвою складовою економіки будь якої країни, територія якої з'єднується з іншими водними шляхами. Корисна транспортна робота, яка забезпечується під час перевезення вантажу або пасажирів, пов'язана з неминучим утворенням шкідливих викидів з випускними газами теплових двигунів (на сам перед – дизелів, як самих розповсюджених генераторів механічної енергії, що встановлюються на морських та річкових судах) [1, 2].

Суднові дизелі, що знаходяться в експлуатації, вимагають постійного пошуку ефективних способів зниження токсичності випускних газів, насамперед викидів оксидів азоту NO_x , оксидів сірки SO_x та монооксиду вуглецю CO . Також актуальним є завдання зниження викидів діоксиду вуглецю CO_2 , які збільшують парниковий ефект та зменшують енергетичну ефективність суден морського та внутрішнього водного транспорту [3, 4]. Розв'язання цього завдання сприяє підвищенню екологічності роботи суден морського транспорту [5, 6].

Одним зі шляхів забезпечення екологічності роботи суден морського транспорту є використання в суднових дизелях альтернативних видів палива. При цьому необхідно визначити, що використання деяких сортів альтернативного палива (перш за все спиртів та ефірів, а також паливних сумішей до яких вони входять) неефективне для забезпечення робочого циклу суднового дизеля. Перш за все це пов'язане з більш низькою теплотворною здатністю подібних палива, а також їх меншою густиною та в'язкістю. Перше призводить до збільшення циклової подачі палива, друге – сприяє порушенню роботи прецизійних пар паливної апаратури високого тиску. Одночасно з цим існують альтернативні палива, які за своїми функціональними характеристиками збігаються з паливом нафтового походження. Це дозволяє використовувати

паливні суміші, до складу яких разом з нафтовим паливом входять альтернативні палива [7, 8]. Найбільшим збігом експлуатаційних властивостей з нафтовими палива характеризуються палива біологічного походження. До другого покоління таких палив відноситься гідроване рослинне мастило (HVO – Hydrotreated Vegetable Oil). Використання цього палива вже має позитивний досвід у стаціонарній енергетиці, але відносно енергетичних установок суден морського транспорту дослідження щодо ефективності HVO мають поодинокі випадки та не мають системного підходу.

Ціль роботи – аналіз експлуатаційних режимів роботи судових дизелів під час використання палива біологічного походження – гідрованого рослинного мастила та визначення впливу паливних сумішей, до складу яких воно входить, на екологічність роботи морських суден.

Основна частина. Дослідження виконувались на трьох однотипних судових дизелях 6S20R2-T2 фірми Mitsubishi Heavy Industries. Експлуатація дизелів під час навігаційних переходів здійснювалась на двох основних сортах палива – DMA20 та RME380. Паливо DMA20 використовувалось під час пускових режимів роботи дизелів, а також під час знаходження судна в районах спеціального екологічного контролю. Паливо RME380 – під час сталих режимів роботи дизелів та в разі знаходження судна поза районів спеціального екологічного контролю. Як альтернативне паливо на судні використовувалось та було досліджене паливо HVO, яке є гідрованим рослинним мастилом.

Під час дослідження один з дизелів експлуатувався виключно на паливі RME380. Два інших – на паливній суміші палива RME380 та палива HVO. Співвідношення палива RME380 та палива HVO під час проведення експериментів у відсотках їх вмісту в паливній суміші складали 90/10, 80/20, 70/30, 60/40.

Дослідження виконувались на експлуатаційних режимах, що відповідали навантаженню на дизелі 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % та 100 % від номінального. Під час досліджень навантаження на дизелі збігались між собою та регулювалися та підтримувалися у необхідних межах за допомогою системи автоматичного регулювання частоти обертання дизелів. Також під час дослідження на дизелях підтримувались відповідні один одному режими мащення та охолодження.

Дослідження виконувались під час навігаційного переходу між портами Південної Америки та країн Середземномор'я, тривалість якого складала 16 діб. Це дозволяло виконати експерименти у повному обсязі для всіх режимів роботи дизелів та всіх характеристик паливної суміші RME380 / HVO. Всі дослідження виконувались під час знаходження судна поза спеціальними екологічними районами – Sulfur emission control areas (SECAs) та Nitrogen oxide emission control areas (NECAs). Це дозволяло використовувати в дизелях паливо RME380 зі вмістом сірки 0,4 % за масою та встановлювало максимальну концентрацію оксидів азоту у випускних газах 14,4 г/(кВт·год).

Аналіз експлуатаційних режимів роботи дизелів виконувався за економічними (питомою витратою палива) та екологічними (емісією оксидів азоту та оксиду вуглецю) показниками роботи дизелів.

Візуалізація результатів дослідження подана на діаграмах рис. 1.

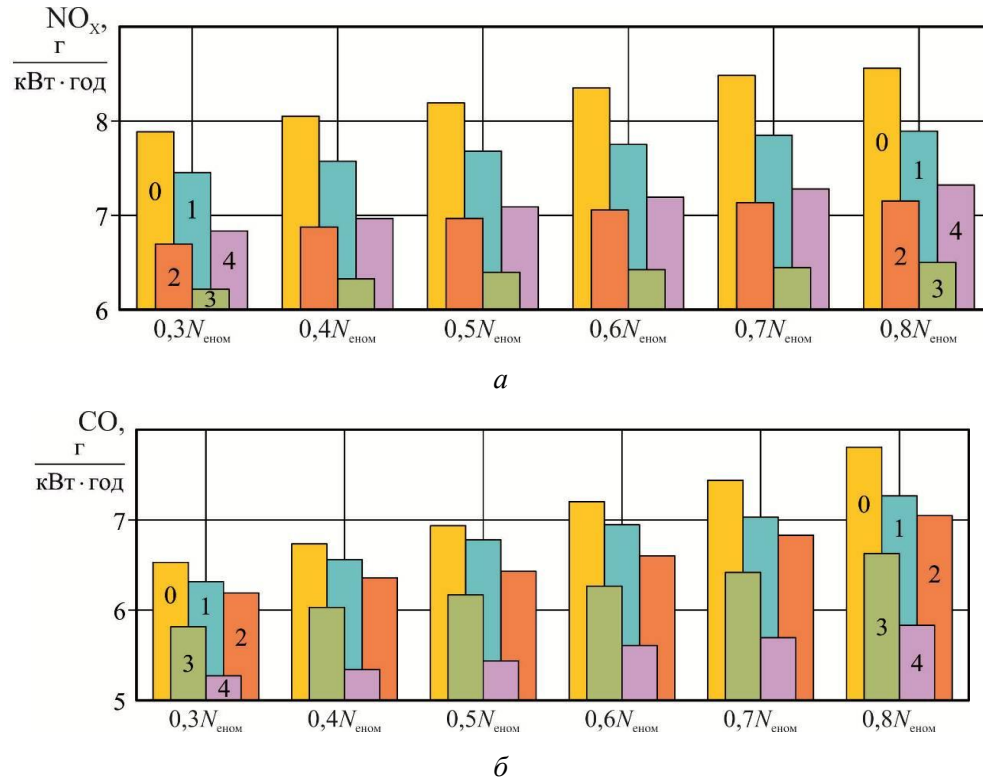


Рисунок 1 – Залежності показників роботи дизеля 6S20R2-T2 від навантаження під час використання палива різного складу:

0 – RME380 ; 1 – 90 % RME380+10 % HVO; 2 – 80 % RME380+20 % HVO;

3 – 70 % RME380+30 % HVO; 4 – 60 % RME380+40 % HVO;

a – емісія оксидів азоту; *б* – об’ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах

Відносні зміни концентрації оксидів азоту ΔNO_x та об’ємного вмісту оксиду вуглецю ΔCO_2 в випускних газах розраховувались за виразами

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{RME} - NO_x^{HVO}}{NO_x^{BME}} \cdot 100\%, \quad \Delta CO = \frac{CO^{RME} - CO^{HVO}}{CO^{RME}} \cdot 100\%,$$

де NO_x^{RME} , NO_x^{HVO} – емісія оксидів азоту під час експлуатації дизеля на паливі RME та його суміші з паливом HVO, г/(кВт·год);

$\text{CO}^{\text{RME}}, \text{CO}^{\text{HVO}}$ – об'ємний вміст оксиду вуглецю в випускних газах під час експлуатації дизеля на паливі RME та його суміші з паливом HVO, %.

За наведеними виразами було визначено використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо класу HVO призводить до зменшення емісії оксидів азоту на 3,9...14,8 % та зменшенню емісії оксидів вуглецю на 3,1...26,5 %. Вказане підвищує екологічність роботи морських суден.

Висновки. 1. Проаналізовано можливості використання як палива в суднових дизелях гідрованого рослинного мастила (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO). 2. Визначено вплив паливних сумішей до складу яких входить паливо класу HVO на екологічність роботи морських суден.

Список літератури

- [1] Khlopenko, M., Gritsuk, I., Sharko, O., Appazov, E. (2024). Increasing the accuracy of the vessel's course orientation. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (2 (75)), 25–30. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.298518>.
- [2] Madey, V. (2022). Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (64)), 34–41. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.
- [3] Sagin, S., Sagin, A., Zablotskyi, Y., Fomin, O., Pištěk, V., Kučera, P. (2025). Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. *Lubricants*, 13 (4), 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
- [4] Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A. et al. (2025). Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.
- [5] Budashko, V., Shevchenko, V. (2021). Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2(110)), 54–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033>.
- [6] Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.
- [7] Petrychenko, O., Levinskyi, M., Prytula, D., Vynohradova, A. (2023). Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects. *Transport Systems*, 41, 96–106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
- [8] Kuropyatnyk, O. A., Sagin, S. V. (2019). Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines. *Naše More*, 66 (1), 1–9. <https://doi.org/10.17818/nm/2019/1.1>

Kuropyatnyk O.A.

Use of HVO fuel to ensure the environmental friendliness of maritime transport vessels

The possibility of ensuring the environmental friendliness of seagoing vessels by using Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as fuel in ship diesel engines was considered. The analysis of the environmental friendliness of the vessel was carried out according to the economic (specific fuel consumption) and environmental (emission of nitrogen oxides and carbon monoxide) indicators of the diesel engines. The most rational operating modes of diesel engines using HVO fuel were experimentally determined, which contribute to increasing the environmental friendliness of the seagoing vessel.

Keywords: hydrogenated vegetable oil, environmental friendliness of the seagoing vessel, emission of nitrogen oxides, emission of carbon oxides

УДК 662.767:620.9

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ І МІНІМІЗАЦІЯ УТВОРЕННЯ ПАРОГАЗОВОЇ ФАЗИ (BOG) У СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ТА РЕГАЗИФІКАЦІЇ LNG (FSRU)

С. В. Нікончук,

аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

serhii.nikonchuk@nuos.edu.ua

Анотація. Ефективне зберігання зрідженого природного газу (LNG) на плавучих установках зберігання та регазифікації (FSRU) залишається актуальною інженерною проблемою через теплопритік і утворення парогазової фази (BOG). У статті розглянуто основні механізми теплових втрат у криогенних системах, проаналізовано сучасні матеріали та технології теплоізоляції, а також узагальнено сучасні підходи до управління BOG, включаючи повторне скраплення, компресію та використання у паливних системах. Особливу увагу приділено новим тенденціям – розвитку композитних матеріалів із наднизькою теплопровідністю, цифровізації моніторингу та впровадженню систем енергетичної інтеграції на борту FSRU. Показано перспективи розвитку технологій з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності та екологічної безпеки.

Ключові слова: зріджений природний газ (LNG), плавуча установка зберігання та регазифікації (FSRU), теплоізоляція, утворення парогазової фази (BOG), енергетична інтеграція, цифрове моделювання, енергоефективність

Вступ. Розвиток LNG-технологій сприяє диверсифікації джерел енергії та зміцненню енергетичної безпеки. FSRU стали важливою ланкою у глобальній інфраструктурі постачання газу завдяки мобільності та здатності швидко розгортатися в регіонах без стаціонарних терміналів.

Водночас експлуатація таких систем супроводжується істотними теплотехнічними втратами, зумовленими притоком тепла через ізоляційні оболонки та утворенням BOG. Це знижує ефективність роботи, ускладнює процеси регазифікації та потребує інтегрованого підходу до управління тепловими потоками.

Огляд присвячено аналізу сучасних тенденцій і рішень у сфері теплоізоляції та систем управління BOG для підвищення ефективності FSRU.

Постановка задачі та мета роботи. Метою роботи є систематизація сучасних технічних рішень, матеріалів і методів управління тепловими процесами в системах зберігання LNG на плавучих платформах типу FSRU.

Для досягнення мети необхідно:

- визначити основні механізми теплових втрат і фактори, що впливають на інтенсивність утворення BOG;
- провести порівняльний аналіз традиційних і новітніх систем теплоізоляції;
- узагальнити сучасні технологічні рішення для управління BOG;
- окреслити перспективні напрями підвищення енергоефективності з використанням цифрових технологій і систем енергетичної інтеграції.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає у комплексному узагальненні сучасних підходів (2018–2025 рр.) до підвищення термoeфективності FSRU на основі:

- класифікації матеріалів теплоізоляції за принципами теплопередачі та стійкістю до морських умов;
- аналізу інтегрованих систем повторного скраплення та утилізації BOG як складових енергетичного контуру;
- систематизації напрямів цифровізації (digital twin, предиктивний моніторинг) у контексті управління тепловими процесами;
- визначення наукових і технічних “вузьких місць”, що потребують подальших експериментальних досліджень.

Теплові втрати в системах зберігання LNG. Зберігання зрідженого природного газу (LNG) на плавучих установках зберігання та регазифікації (FSRU) супроводжується постійним тепловим впливом з боку навколишнього середовища. Висока різниця температур між рідким газом (приблизно $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$) та морським повітрям або водою призводить до неперервного притоку тепла крізь огорожувальні конструкції, що, у свою чергу, викликає випаровування LNG та утворення BOG (boil-off gas). Цей процес є неминучим навіть у системах із високоефективною теплоізоляцією й суттєво впливає на енергетичну ефективність установки.

Основні шляхи теплопередачі до внутрішнього об’єму резервуара поділяють на три типи: теплопровідність, конвекцію та теплове випромінювання. Додатково на процес впливають динамічні фактори — морська качка, коливання температури довкілля та старіння матеріалів ізоляції.

Теплопровідність

Через металеву стінку резервуара, опорні елементи й шари ізоляції тепло передається за законом Фур’є. Для багатошарової конструкції тепловий потік визначають як:

$$q = (T_a - T_{\text{LNG}}) / \Sigma(d_i / k_i) \quad (1)$$

де

q – густина теплового потоку, Вт/м²;

T_a – температура навколишнього середовища, °С;

T_{LNG} – температура зрідженого природного газу, °С;

d_i – товщина i -го шару ізоляції, м;

k_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару, Вт/(м·К).

Із формули (1) випливає, що збільшення сумарного термічного опору шару ізоляції (зменшення k_i або збільшення d_i) призводить до зниження теплових втрат.

Конвекція

На зовнішній поверхні резервуара конвективний теплообмін зумовлений циркуляцією повітря та впливом вітру. Підвищення швидкості потоку навколо оболонки зменшує товщину прикордонного шару й збільшує коефіцієнт тепловіддачі, що підсилює притік тепла. В умовах високої вологості чи хвильового впливу додатковим чинником стає утворення тонкої водяної плівки на поверхні, яка погіршує ізоляційні властивості.

Теплове випромінювання

Радіаційний перенос енергії з боку Сонця та навколишніх об'єктів може суттєво збільшувати загальне теплове навантаження на ізоляційну оболонку. Особливо це відчутно у тропічних регіонах, де густина сонячного потоку перевищує 800 Вт/м². Для зменшення впливу застосовують відбивні екрани та багатошарові покриття з низьким коефіцієнтом випромінювання (0,05–0,1).

Динамічні фактори та деградація ізоляції

Під час експлуатації FSRU ізоляційні матеріали зазнають вібрацій, навантажень від качки, коливань тиску та зволоження. Це поступово погіршує їхню мікроструктуру, підвищує теплопровідність і збільшує частку BOG. Дослідження показують, що деградація ізоляції на 5–10 % призводить до суттєвого збільшення добового утворення BOG.

Теплове моделювання

Нестационарний характер процесів описується рівнянням неусталеного теплопереносу:

$$\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2 \quad (2)$$

де

T – температура, К;

t – час, с;

α – температуропровідність, м²/с;

x – координата по товщині шару, м.

Розв'язання цього рівняння дозволяє прогнозувати зміну температурного поля в ізоляційних шарах і визначати локальні зони підвищених втрат. Для складних геометрій використовують чисельні методи CFD, які враховують конвекцію у паровій зоні та радіаційний обмін між поверхнями.

Таким чином, точна оцінка механізмів теплопередачі в системах зберігання LNG є основою для підвищення енергоефективності FSRU та оптимізації систем управління BOG.

Матеріали та технології теплоізоляції

Для мінімізації теплопритоку в системах зберігання зрідженого природного газу (LNG) застосовується широкий спектр ізоляційних технологій, що відрізняються принципом роботи, вартістю, масою, стійкістю до вологи та здатністю зберігати характеристики протягом тривалої експлуатації в морських умовах. Вибір матеріалів визначається співвідношенням між тепловими втратами, механічною надійністю, простотою обслуговування й можливістю відновлення ізоляції під час технічних перерв.

Традиційні системи теплоізоляції

Одним із найпоширеніших рішень є перлітова вакуумна ізоляція, де між внутрішнім і зовнішнім резервуарами створюється вакуумований простір, заповнений розширеним перлітом. Така комбінація значно зменшує теплопровідність і практично усуває конвекцію в міжстінковому просторі. Головним недоліком цього типу є поступова осадка перліту або порушення герметичності вакууму, що призводить до втрати ефективності з часом.

Іншим поширеним варіантом є багатошарова вакуумна ізоляція (MLI), у якій чергуються відбивні фольгові екрани та малотеплопровідні прокладки. Вакуум усуває конвекцію, а відбивні поверхні зменшують радіаційне випромінювання. Кожен додатковий шар MLI може зменшувати тепловий потік приблизно на 40–50 %, залежно від рівня вакууму. Водночас збільшення кількості шарів ускладнює монтаж і потребує високої чистоти виробництва.

Для транспортних цистерн і менших резервуарів використовують жорстку пінополіуретанову (PU) ізоляцію, яка характеризується простотою нанесення, відносно низькою вартістю та прийнятними теплофізичними властивостями. Однак вона є менш ефективною при тривалому контакті з вологою, схильна до старіння та має вищу теплопровідність порівняно з вакуумними системами.

Сучасні та перспективні матеріали

Найбільш динамічний розвиток у галузі ізоляційних технологій демонструють аерогелеві матеріали. Вони мають надзвичайно низьку густину ($100\text{--}200\text{ кг/м}^3$), мікропористу структуру та теплопровідність у межах $0,012\text{--}0,018\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Аерогелеві покриття добре працюють у вакуумі, не втрачають властивостей при термоцикуванні й демонструють кращу механічну стійкість, ніж порошкові матеріали.

Окрему групу становлять композити на основі армованих волокон (FRAB – Fiber Reinforced Aerogel Blankets), що поєднують низьку теплопровідність з високою гнучкістю та стійкістю до вібрацій. У випробуваннях для LNG-резервуарів ці матеріали показали зменшення питомих теплових втрат на 15–20 % у порівнянні з традиційними вакуумними системами.

Критерії вибору матеріалів

Основними параметрами, що визначають вибір ізоляційного матеріалу для LNG-резервуарів, є:

- теплопровідність у криогенному діапазоні температур;
- стійкість до вібрацій, вологи та термоцикування;
- стабільність структури під час качки й навантажень;
- густина матеріалу та вплив на плавучість судна;
- довговічність і простота ремонту в морських умовах;
- сумісність із матеріалами корпусу та покриттів.

За експлуатаційними спостереженнями, зменшення теплопередачі через ізоляційні шари приблизно на 10 % забезпечує зниження добового утворення BOG на 12–15 %, що пояснюється нелінійною залежністю процесу випаровування від теплового навантаження та ефектами стабілізації температурного поля.

Сучасні підходи до управління парогазовою фазою (BOG)

Управління парогазовою фазою (BOG – boil-off gas) є одним із ключових аспектів експлуатації плавучих установок зберігання та регазифікації зрідженого природного газу (FSRU). У процесі експлуатації через теплопритік до резервуара LNG частина рідини переходить у газову фазу. Якщо тиск у резервуарі не контролювати, це може призвести до небезпечного перевищення розрахункових параметрів. Тому системи збору, стиснення, скраплення та утилізації BOG є обов'язковими елементами сучасних LNG- і FSRU-комплексів.

Основною метою таких систем є зменшення енергетичних втрат і запобігання викидам метану в атмосферу. Ефективне управління BOG дозволяє перетворювати потенційно втрачений ресурс на корисну енергію, одночасно зменшуючи вуглецевий слід і підвищуючи енергоефективність установки.

Системи повторного скраплення

Найефективнішим способом переробки BOG є повторне скраплення. Газ із парової зони резервуара подається на компресор, стискається до тиску 1,2–1,5 МПа, після чого охолоджується у теплообміннику (найчастіше — у циклі зі змішаним холодоагентом, SMR – Single Mixed Refrigerant). Після досягнення температури скраплення газ повертається до резервуара у вигляді рідини, забезпечуючи стабільність тиску.

Такі системи дозволяють зменшити втрати LNG до 0,02–0,05 % на добу, що суттєво покращує енергетичний баланс.

Недоліком є висока енергозатратність компресорного циклу (до 0,2–0,3 % енергії від загального потоку LNG) та складність технічного обслуговування.

Компресійне використання та паливна інтеграція

Інший підхід – використання BOG як палива для головних або допоміжних двигунів судна. У цьому випадку газ стискають до тиску двигуна (близько 1–2 МПа) і подають безпосередньо у систему спалювання.

Така стратегія дозволяє зменшити витрати на паливо та уникнути необхідності повторного скраплення.

На сучасних FSRU застосовують інтегровані паливні цикли, які автоматично регулюють баланс між споживанням BOG та його генерацією, що дозволяє уникнути надлишкового тиску й зменшити втрати до мінімуму.

Збалансовані системи BOG

Для стабільної роботи всієї енергосистеми FSRU важливо забезпечити баланс між утворенням і споживанням BOG. У разі надлишку газу його можна тимчасово стискати та накопичувати у буферних ємностях, а при нестачі – використовувати резервні компресори або підсмоктування з нижніх шарів резервуара. Збалансовані системи зазвичай працюють у зв'язці з програмним управлінням, що базується на прогнозуванні швидкості утворення газу, температури навколишнього середовища та режимів навантаження.

Прогнозування та цифрове управління

Сучасні FSRU дедалі частіше оснащуються цифровими системами управління BOG, які використовують аналітичні моделі або машинне навчання для прогнозування динаміки пароутворення.

Такі алгоритми враховують температуру, тиск, рівень рідини, склад газу, швидкість вітру, вологість повітря й інші фактори, які впливають на швидкість випаровування. Завдяки цим даним система автоматично коригує роботу компресорів, клапанів і скраплювальних контурів, підтримуючи оптимальні умови.

Безпека та запобігання rollover-ефекту

Окрему увагу приділяють феномену “rollover” – різкому викиду BOG, що може статися при змішуванні шарів LNG різної щільності та температури. Цей процес здатен багаторазово збільшити швидкість випаровування.

Для запобігання rollover-ефекту використовують:

- датчики щільності та температури по висоті резервуара;
- контроль швидкості закачування та відбору LNG;
- алгоритми, які виявляють небезпечне температурне розшарування.

Застосування цифрового моніторингу дозволяє знизити ймовірність таких подій майже до нуля та забезпечити стабільну роботу FSRU навіть при зміні режимів навантаження.

Таким чином, сучасні технології управління BOG розвиваються у напрямі повної енергетичної інтеграції – коли надлишковий газ не є втратами, а стає частиною енергетичного циклу судна. Це не лише знижує собівартість експлуатації, а й мінімізує вплив на довкілля.

Нові тенденції підвищення енергоефективності FSRU

Сучасні плавучі установки зберігання та регазифікації (FSRU) розвиваються в умовах зростаючих вимог до енергоефективності, зменшення викидів та підвищення рівня автоматизації. З огляду на це, на перший план виходять інтегровані підходи до використання енергії, відновлення холоду та цифровізації управління тепловими процесами.

Одним із провідних напрямів є цифровізація систем контролю та оптимізації. Використання технологій цифрового двійника (Digital Twin), штучного інтелекту та машинного навчання дає змогу моделювати поведінку систем у реальному часі, прогнозувати споживання енергії, а також оптимізувати режими роботи обладнання. Такі системи дозволяють не лише зменшувати втрати енергії, але й прогнозувати відмови вузлів, забезпечуючи підхід предиктивного обслуговування.

Іншим важливим трендом є впровадження модульних і маломасштабних FSRU. Зменшення розмірів та модульна структура дозволяють швидше вводити установки в експлуатацію, адаптувати їх до конкретних умов споживача й підвищувати гнучкість енергопостачання. Модульність також сприяє стандартизації виробництва та зниженню витрат на обслуговування.

Значний потенціал має інтеграція систем рекуперації холоду LNG та вловлювання вуглецю (CCS). Використання холодоенергії зрідженого газу дозволяє охолоджувати повітря для виробництва рідкого кисню чи азоту, або забезпечувати попереднє охолодження потоків у системах уловлювання CO₂. Таким чином досягається підвищення енергоефективності не лише FSRU, а й суміжних процесів.

Розвиток високоефективних матеріалів та гібридних систем теплоізоляції також сприяє зниженню втрат енергії. Комбінація аерогелів, вакуумних панелей та адаптивних шарів з керованою теплопровідністю забезпечує стабільні параметри навіть при довготривалій експлуатації у складних кліматичних умовах.

Окрему увагу приділяють використанню відновлюваних джерел енергії та систем енергетичної автономності. FSRU нового покоління оснащуються підключенням до берегових мереж ("shore power"), фотоелектричними панелями та установками рекуперації тепла з вихлопних газів. Це дозволяє скоротити споживання палива й знизити експлуатаційні витрати.

Загалом тенденції розвитку FSRU вказують на перехід від окремих енергетичних рішень до інтегрованих систем, де зберігання, регазифікація та енергоперетворення функціонують як єдиний комплекс. Такий підхід формує основу для створення енергоефективних, екологічно чистих та інтелектуальних плавучих енергетичних платформ.

Математичне моделювання та цифрові двійники LNG/FSRU

Математичне моделювання є ключовим інструментом для аналізу теплових процесів, управління пароутворенням та оптимізації енергоефективності систем зберігання і регазифікації зрідженого природного газу (LNG). Сучасні обчислювальні засоби дозволяють поєднувати термодинамічні, гідродинамічні та структурно-механічні моделі в єдину симуляційну систему, що забезпечує глибоке розуміння процесів у FSRU.

Теплові процеси в ізоляційних системах резервуарів описуються рівняннями нестационарного теплопереносу (1), які враховують провідність, конвекцію та випромінювання. Узагальнене рівняння теплового балансу для багатошарової ізоляції має вигляд:

$$q = (T_a - T_{LNG}) / \sum (d_i / k_i) \quad (3)$$

де

q – густина теплового потоку, Вт/м²;

T_a – температура навколишнього середовища, °C;

T_{LNG} – температура LNG, °C;

d_i – товщина i -го шару ізоляції, м;

k_i – коефіцієнт теплопровідності i -го шару, Вт/(м·K).

Для динамічної оцінки процесів використовується рівняння неусталеного теплопереносу:

$$\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2 \quad (4)$$

де

T – температура, K;

t – час, с;

α – температуропровідність матеріалу, м²/с;

x – координата по товщині шару, м.

Ці моделі розв'язуються чисельно з використанням програмних комплексів ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, OpenFOAM, які дозволяють аналізувати теплопровідність, конвекцію в газовій фазі та взаємодію між конструкційними елементами. Для моделювання технологічних процесів регазифікації та повторного скраплення використовують Aspen HYSYS або Aspen Plus.

Технологія цифрового двійника (Digital Twin) розширює можливості традиційного моделювання, забезпечуючи постійний зв'язок між віртуальною моделлю та реальним об'єктом через систему сенсорів і дані моніторингу. Цифрові двійники дозволяють відстежувати стан ізоляції, прогнозувати утворення BOG, оптимізувати режими охолодження та виявляти відхилення від нормальної роботи систем у реальному часі.

Одним із прикладів застосування цифрових двійників у галузі LNG є система Structural Performance Management (SPM), розроблена компанією Akselos. Вона використовує скорочену базу методів кінцевих елементів (RB-FEA), що прискорює розрахунки у 1000 разів порівняно з

традиційним FEM. Це дозволяє проводити моніторинг напружень, деформацій і втоми матеріалів у реальному часі, що критично важливо для безпечної експлуатації модулів регазифікації.

Окрім структурного аналізу, цифрові двійники застосовуються для оперативного управління технологічними процесами – передбачення моментів, коли швидкість утворення BOG перевищує допустимі межі, оптимізації графіків скраплення та регазифікації, а також адаптації режимів роботи компресорів і теплообмінників під реальні теплові навантаження.

Використання цифрових двійників у комплексі з математичним моделюванням створює новий рівень управління енергоефективністю FSRU. Завдяки інтеграції з системами машинного навчання можливо реалізувати предиктивне керування – коли модель не лише відображає поточний стан, а й прогнозує майбутні відхилення, забезпечуючи попереджувальні дії для запобігання втратам енергії.

Таким чином, цифрові двійники виступають мостом між дослідницькими моделями та промисловими процесами, поєднуючи теорію, експеримент і моніторинг в єдину систему управління життєвим циклом FSRU.

Висновки та рекомендації

Проведений аналітичний огляд показав, що ефективність плавучих установок зберігання та регазифікації зрідженого природного газу (FSRU) значною мірою залежить від рівня теплотехнічної досконалості систем ізоляції, організації процесів управління парогазовою фазою (BOG) та ступеня цифровізації експлуатаційних процесів.

Основним засобом зниження теплопритоку залишається вдосконалення теплоізоляційних систем. Нові матеріали, такі як аерогелі, композитні вакуумні панелі й багатошарові ізоляційні структури, демонструють коефіцієнти теплопровідності нижче 0,025 Вт/(м·К), що забезпечує зменшення добових втрат LNG у 2–3 рази порівняно з традиційними рішеннями.

Сучасні системи управління BOG орієнтуються на комплексне використання надлишкового газу — через повторне скраплення, компресію або паливну інтеграцію. Комбіновані схеми утилізації дозволяють підвищити загальну енергетичну ефективність FSRU на 15–20 %.

Перспективним напрямом розвитку є застосування інтегрованих енергетичних рішень: рекуперація холодоенергії LNG, використання відпрацьованого тепла двигунів, а також зв'язок із системами уловлювання CO₂. Це створює основу для зменшення питомого споживання енергії й підвищення екологічної ефективності.

Технології математичного моделювання та цифрових двійників відкривають нові можливості для управління життєвим циклом FSRU. Інтеграція термодинамічних моделей із системами моніторингу дає змогу прогнозувати утворення BOG, оптимізувати режими регазифікації та запобігати аварійним відхиленням.

У перспективі очікується поєднання фізичних і цифрових моделей у єдині системи керування, що дозволить перейти від реактивного до предиктивного управління енергетичними процесами.

Рекомендації для подальших досліджень:

- провести експериментальну перевірку ефективності нових типів ізоляційних матеріалів в умовах морської експлуатації;
- розробити алгоритми об'єднання моделей теплопередачі, динаміки BOG і регазифікації в єдину цифрову платформу управління;
- створити методику оцінки енергетичної ефективності FSRU з урахуванням повного життєвого циклу, включно з утилізацією холоду та викидами CO₂.

Результати аналізу свідчать, що майбутнє FSRU пов'язане з інтеграцією термічних, енергетичних і цифрових технологій у єдину інтелектуальну систему. Такий підхід сприятиме не лише підвищенню енергоефективності, але й зменшенню екологічного впливу та продовженню ресурсу експлуатації LNG-комплексів.

Основні результати.

1. Визначено п'ять головних механізмів теплових втрат у системах зберігання LNG – теплопровідність, конвекцію, випромінювання, утворення BOG і динамічні впливи (кача, деградація ізоляції).
2. Проаналізовано класичні (перлітова, вакуумна, поліуретанова) та сучасні (аерогелеві, багатошарові, “розумні”) системи теплоізоляції.
3. Узагальнено підходи до управління BOG: повторне скраплення, компресія з використанням у паливних циклах, балансування потоків і цифрове прогнозування.
4. Виявлено тенденцію до впровадження інтегрованих рішень – енергетичної утилізації холоду LNG, цифрових двійників і систем машинного навчання для моніторингу стану ізоляції та прогнозування утворення BOG.
5. Зроблено висновок, що поєднання інноваційних ізоляційних матеріалів, цифрових технологій і енергетичної інтеграції забезпечує зменшення теплових втрат і підвищення ефективності експлуатації FSRU.

Література:

- [1] International Energy Agency. (2023). *Medium-Term Gas Report 2023*. IEA. <https://doi.org/10.1787/MTGR-2023-en>
- [2] Naveiro, M., et al. (2021). Energy efficiency and environmental measures for Floating Storage Regasification Units (FSRUs). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 94, 104036. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104036>
- [3] Naveiro, M., et al. (2022). Thermodynamic and environmental analyses of a novel closed-loop regasification system for FSRUs. *Energy Conversion and Management*, 260, 115622. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115622>

- [4] Hwang, C., et al. (2022). Energy, economic and environmental analysis of a BOG re-liquefaction process for an LNG carrier. *Energy Reports*, 8, 7280–7292. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.154>
- [5] Jin, C., et al. (2023). Performance analysis of a BOG re-liquefaction process using a single mixed refrigerant (SMR) cycle. *Energy*, 272, 127099. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127099>
- [6] Jo, Y.-P., et al. (2021). Dynamic modeling and offset-free predictive control of LNG storage tank pressure. *Fuel*, 303, 121289. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121289>
- [7] Shin, K., et al. (2022). Dynamic modeling and predictive control of boil-off gas in LNG tanks. *Computers & Chemical Engineering*, 165, 107888. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107888>
- [8] Nezhad, M. M., et al. (2024). Marine energy digitalization: Digital twin approaches—opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113530. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113530>
- [9] Akselos. (2023). How can digital twin technology optimise LNG regasification terminals? *Technical Article*. <https://www.akselos.com/digital-twin-lng>
- [10] Offshore Magazine. (2023). Digital twin technology: Optimizing efficiency for offshore facilities. <https://www.offshore-mag.com/articles/digital-twin-efficiency>
- [11] LNG2023 Conference. (2023). Digital twin case studies from around the world. <https://www.lng2023.org/research-innovation>
- [12] Camplese, D., et al. (2024). Modeling the performance of multilayer insulation (MLI) for cryogenic storage. *Cryogenics*, 138, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2024.103586>
- [13] Hajhariri, A., et al. (2024). Impact of spacer design on thermal degradation in MLI systems. *Applied Thermal Engineering*, 241, 121912. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.121912>
- [14] Wang, F., et al. (2024). Enhancing power generation via LNG cold-energy Organic Rankine Cycle. *Energy*, 283, 129302. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.129302>
- [15] Zhu, J., et al. (2023). BOG precooling for subsea low-temperature systems with absorption refrigeration integration. *Energy Nexus*, 10, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100221>
- [16] Tian, Z., et al. (2024). BOG–ORC–CCS system for direct BOG re-liquefaction: Towards low-carbon shipping. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.139892>
- [17] Naveiro, M., et al. (2021). Energy, exergy and economic analysis of offshore regasification in FSRUs. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17156–17169. <https://doi.org/10.1002/er.6625>
- [18] International Energy Agency. (2025). Gas Market Lessons from the 2022–2023 Energy Crisis. IEA. <https://doi.org/10.1787/GML-2025-en>

Energy-efficient thermal management and boil-off gas reduction in fsru systems for liquefied natural gas

Nikonchuk S.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Abstract. Efficient containment of liquefied natural gas (LNG) in floating storage and regasification units (FSRUs) remains a key engineering challenge due to unavoidable heat ingress and the resulting formation of boil-off gas (BOG). This paper reviews the principal mechanisms of thermal losses in cryogenic LNG storage systems, examines conventional and advanced insulation materials, and summarizes modern strategies for BOG management, including reliquefaction, compression, and fuel integration. Particular attention is paid to emerging trends such as the development of composite insulation materials with ultra-low thermal conductivity, digitalization of monitoring systems, and the implementation of integrated energy-recovery solutions aboard FSRUs. The study highlights the potential of combining innovative insulation, predictive control, and digital twin technologies to enhance the thermal efficiency and environmental performance of LNG operations.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), floating storage and regasification unit (FSRU), thermal insulation, boil-off gas (BOG), energy integration, digital twin, energy efficiency

УДК 621.4:536.2:620.9

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУР НА ПРОЦЕСИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Д. Ж. Боду, аспірант,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна

Dennie995@gmail.com

Анотація. В роботі обґрунтована постановка завдання на дослідження, метою якого є підвищення ефективності перенесення низькопотенційної теплоти з поверхні рекуперативного теплообмінного апарату за рахунок розподілу температури в процесах фазового переходу.

Ключові слова: фазовий перехід, теплові труби, утилізація низькопотенційної теплоти, теплота; тепловіддача.

Вступна частина. Обсяг теплових викидів суднових енергетичних установок (СЕУ) з температурним потенціалом в межах 480–530 К досягає $(4,3\text{--}4,9) \times 10^{15}$ кДж, з яких 2,5–8,5 % від них утилізується (Таблиця 1).

Таблиця 1 – Температури відхідного тепла сучасних суднових СЕУ

Джерело теплоти/теплоносії	Температура, К [12]		% загальних втрат теплоти [8]
	Низькооборотні двигуни	Середньооборотні двигуни	
Вихлопні гази	490–530К	500–690	20–35 % [9]
Надувне повітря	400–490	380–470	15–25 % [10]
Рідина сорочок охолодження	355–360	360–370	15–25 % [10]
Допоміжні двигуни (вихлоп, охолодження)	470–670 [8]		10–20 % [11]
Скrapлений природний газ	111		—
Скrapлений аміак	250		

А тому зменшення цього обсягу є суттєвим заходом щодо поліпшення технічних, економічних та екологічних характеристик суднових енергетичних установок [1]. Крім того, системи утилізації теплоти є також актуальним питанням для міських систем теплопостачання [6] та виробничих процесів [5,7].

Актуальною науково-технічною проблемою є рекуперація низькопотенційної теплоти. Її ефективність суттєво залежить від просторово-часової нерівномірності теплових потоків на поверхнях теплопередачі [2]. В свою чергу, саме процеси та конструкція теплообмінників в

значній мірі визначають умови підвищення рівня теплопередачі пов'язані з досягненнями однорідностей температурних полів у зонах теплопередачі.

Наявні підходи здебільшого порівнюють поверхневі однофазні теплообмінники та не враховують двофазні інтерфейси, які природно згладжують температурні поля [4]. Проте в них бракує знань щодо забезпечення максимальної різниці температур між теплоносіями з урахуванням їх просторово-часові залежності для відповідних теплових двигунів та енергетичних установок.

***Ціль роботи** – обґрунтування ефективності роботи систем утилізації низькопотенційної теплоти теплообмінними апаратами з фазовим переходом для суднових теплових двигунів та енергетичних установок.*

Основна частина. В якості основного джерела енергії на судах широко використовуються дизельні двигуни, які мають теплову ефективність в діапазоні від 40 до 45 %, але більше половини тепла втрачається у вигляді вихлопних газів та від води з сорочки охолодження двигуна, з яких теплота відпрацьованих газів становить 20–35 % від загальної теплотворної здатності дизеля, а температура вихлопних газів становить 200–450 °С за повних робочих умов [3]. Відповідно, існують значні обсяги теплоти, яка може бути утилізована. Експеримент на стенді морського ДВЗ для випробуваного теплообмінника відпрацьованих газів демонструє ефективність відбору тепла на рівні >70 % при оптимізованій витраті води; вихідна вода 55–85 °С, на різних навантаженнях [3]. Тоді як із теплообмінниками з фазовим переходом ця ефективність може бути збільшена на 20–25 % тобто до ≈86 %. Відповідно, існує потенціал до утилізації додатково приблизно 16–30 % від теплотворної здатності палива [15].

В теплоутилізуючих системах можливе використання різних типів термодинамічних циклів, такі як, наприклад, органічний цикл Ренкіна, цикл Каліни, трилатеральний цикл Ренкіна та інші [14]. Відповідно в таких системах може використовуватись найрізноманітніше обладнання: регенеративні та рекуперативні теплообмінники, економайзери, котли-утилізатори, термоакустичні двигуни, термоелектричні генератори, тощо [14].

Ефективність же значної кількості цих елементів систем утилізації низькопотенційної теплоти безпосередньо визначається ефективністю передачі теплоти в теплообміннику. Одним із ключових чинників тут виступає рівномірність теплових потоків, а також величина градієнта температурного поля у зоні теплообміну. Саме нерівномірність розподілу теплових потоків негативно позначається на загальній теплопередачі, оскільки в результаті самоусереднення температур у процесі теплообміну, спостерігається зниження різниці температур вздовж поверхні теплообміну. Це призводить до зменшення ефективності роботи теплообмінних апаратів і, відповідно, до зменшення загальної продуктивності систем утилізації теплоти.

В тому числі й для термоакустичних двигунів нерівномірність теплових потоків на гарячому та холодному теплообмінниках, а також в стеку, негативно впливає на їх ефективність. Так підвищення використання теплообмінників із фазовим переходом в термоакустичних

двигунах здатне підвищити ефективність їх роботи в системах утилізації низькопотенційної теплоти на рівні 10–30 % [2]. Що, в свою чергу, позитивно відображається на масогабаритних показниках, та зменшує їх на 10–25 %.

З метою підвищення ефективності теплообміну в системах утилізації низькопотенційної теплоти доцільно впроваджувати конструктивні та технологічні рішення, які забезпечують мінімізацію температурної нерівномірності на поверхнях теплообміну. До таких рішень можна віднести застосування теплообмінників з фазовим переходом, що дозволяє не лише інтенсифікувати процес теплопередачі завдяки використанню прихованої теплоти фазового переходу, але й суттєво знизити нерівномірність градієнту температур по теплообміннику, адже процес фазового переходу відбувається при постійній температурі.

Розвиток матеріалознавства також має суттєве значення в підвищенні ефективності систем утилізації низькопотенційної теплоти в суднових енергетичних установках. Створення сучасних матеріалів із покращеними тепловими, механічними та хімічними властивостями є необхідною умовою для поліпшення ефективності та довговічності технологій утилізації теплоти. Науковці зосереджуються на розробці нових сплавів і композиційних матеріалів, здатних протистояти суворим умовам морського середовища, таким, як висока солоність, вологість та перепади температур. Покращення ефективності утилізації теплоти оцінюється на в діапазоні 10–25 % за рахунок застосування кращих технологій при виготовленні теплообмінників [8].

Отже, *основна мета* роботи досягається виконанням наступних завдань:

- проведення порівняльного аналізу ефективності використання теплообмінників з фазовим переходом із рекуперативними поверхневими однофазними теплообмінниками в системах утилізації низькопотенційної теплоти;
- визначення впливу процесів фазового переходу на зменшення просторово-часового розподілу нерівномірності температурних полів теплоносіїв, а також представлення кількісно-якісних показників впливу зменшення цієї нерівномірності на техніко-економічні показники теплових двигунів та енергетичних установок;
- розробка схемних рішень теплоутилізуючих систем в складі СЕУ;
- розробка рекомендацій щодо впровадження ефективних теплоутилізуючих систем в транспортній і стаціонарній теплоенергетиці.

У рамках даної роботи моделювання буде проводитись для систем утилізації низькопотенційної теплоти з акцентом на дослідження теплообмінників із фазовим переходом та порівняння їх із рекуперативними поверхневими однофазними теплообмінниками. Особлива увага приділятиметься аналізу температурних полів теплоносіїв у процесі теплопередачі, оцінці просторово-часових коливань та їх впливу на ефективність роботи системи. Для реалізації моделювання планується використання чисельно-математичних методів, таких як метод

скінченних елементів та метод скінченних різниць, що дозволяють деталізовано досліджувати теплові процеси у складних конструкціях теплообмінників.

Теоретична значимість дослідження полягає у поглибленні розуміння механізмів теплопередачі в умовах фазового переходу, а також у формуванні науково обґрунтованих підходів до оптимізації роботи теплоутилізуючих систем. Отримані результати моделювання дозволяють унаочнити вплив параметрів теплоносіїв та конструкційних особливостей теплообмінників на розподіл температурних полів і, відповідно, на ефективність енергетичних процесів. Застосування чисельно-математичних методів в аналізі дозволяє деталізовано розглядати складні теплові явища, що, своєю чергою, відкриває перспективи для вдосконалення існуючих та розробки нових конструкцій обладнання для систем утилізації низькопотенційної теплоти.

Практична значимість дослідження полягає у можливості впровадження отриманих результатів моделювання та аналізу в реальні системи утилізації низькопотенційної теплоти, що дозволяє підвищити їхню енергоефективність та конкурентоспроможність як у транспортній, так і у стаціонарній теплоенергетиці. Результати дослідження можуть бути використані під час проектування нових або модернізації існуючих теплоутилізуючих систем, а також при розробці нормативних документів та рекомендацій для галузі, забезпечуючи сталий розвиток і підвищення екологічної безпеки енергетичних процесів.

Висновки.

1. Утилізація низькопотенційної теплоти СЕУ на рівні 480–530 К за розрахунковими оцінками теплопередачі при умові однорідних і сталих температурних полів теплоносіїв дозволяє отримати 10–35 % від загального обсягу скидної теплоти.
2. Для котлів утилізаторів на базі теплових труб ефективність використання скидної теплоти для мало- та середньообертових двигунів складає 70–85 %, та використання теплообмінників із фазовим переходом може додатково утилізувати 16–30 %.
3. Для термоакустичних двигунів підвищення ефективності використання скидної теплоти на рівні 10–30 % при використанні теплообмінних апаратів з фазовим переходом зменшує їх масогабаритні показники на 15–25 %.

Література

- [1] Zongming Yang, Volodymyr Korobko, Mykola Radchenko, Roman Radchenko. (2022). Improving thermoacoustic low-temperature heat recovery systems. Zhenjiang, China; Mykolaiv, Ukraine. Sustainability, MDPI.
URL: <https://doi.org/10.3390/su141912306>
- [2] Volodymyr Korobko, Anatoliy Shevtsov, Serhiy Serbin, Huabing Wen, Marek Dzida. (2024). Impact of the type of heat exchanger on the characteristics of low-temperature thermoacoustic heat engines. International Journal of Thermofluids, Volume 24.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100953>
- [3] Li Luo, Yuhang Fan, Yu Wang, Peiyong Ni, Xuwen Zhang. (2022). Experiment Study on the Exhaust-Gas Heat Exchanger for Small and Medium-Sized Marine Diesel Engine, Energy Engineering Tech Science Press
URL: <http://dx.doi.org/10.32604/ee.2022.022295>

- [4] В. В. Коробко, А. П. Шевцов. (2024). Використання гравітаційних термосифонів у суднових термоакустичних WHRS. Тези доп., ММНПК МРР&О-2025 (Одеса, 4 бер. 2025 р.), Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова.
- [5] Hussam Jouhara, Nerea Nieto, Bakartxo Egilegor, Josu Zuazua. (2023). Waste heat recovery solution based on a heat pipe heat exchanger for the aluminium die casting industry, *Energy*, Volume 266.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126459>
- [6] Juan Jerez Monsalves, Claire Bergaentzle, Dogan Keles. (2024). Waste-heat recovery utilisation for district heating systems under diverse pricing schemes: A bi-level modelling approach. *Applied Energy*, Volume 375.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124032>
- [7] Sarah Brueckner, Laia Miró, Luisa F. Cabeza, Martin Pehnt, Eberhard Laevemann. (2014). Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 38.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.078>
- [8] Tymoteusz Miller, Irmina Durlak, Ewelina Kostecka, Polina Kozlovskaya, Andrzej Jakubowski, Adrianna Łobodzińska. (2024). Waste Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency, *Energies*, MDPI.
- [9] Lion, S.; Vlaskos, I.; Taccani, R. (2020). A Review of Emissions Reduction Technologies for Low and Medium Speed Marine Diesel Engines and Their Potential for Waste Heat Recovery. *Energy Convers. Manag.*
URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>
- [10] Liu, Y.; Lu, H.; Li, Y.; Xu, H.; Pan, Z.; Dai, P.; Wang, H.; Yang, Q. (2021). A Review of Treatment Technologies for Produced Water in Offshore Oil and Gas Fields. *Sci. Total Environ.*
URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>
- [11] Konur, O.; Colpan, C.O.; Saatcioglu, O. Y. (2022). A comprehensive review on organic Rankine cycle systems used as waste heat recovery technologies for marine applications. *Energy sources part a recovery util. Environ. Eff.*
URL: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2072981>
- [12] Volodymyr Korobko, Serhiy Serbin, Huu Chong Le. (2023). Exploration of a model thermoacoustic turbogenerator with a bidirectional turbine, *Polish Maritime Research*, No 4.
URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0063>
- [13] Seungjae Lee, Sukkyung Kang, Yunseo Kim, Gyohoon Geum. (2025). Thermal design framework of heat pipe heat exchanger for efficient waste heat recovery. *Energy*, Volume 318, 1 March 2025
URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134731>
- [14] C. Ononogbo, E.C. Nwosu, N.R. Nwakuba, G.N. Nwaji. (2023). Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation. *Heliyon*, Volume 9, Issue 2.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13590>
- [15] Haydar Kepekci, Cuneyt Ezgi. (2024). Thermodynamic Analysis of a Marine Diesel Engine Waste Heat-Assisted Cogeneration Power Plant Modified with Regeneration Onboard a Ship. *Marine Science and Engineering*, MDPI.
URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12091667>

Investigation of the impact of the temperature distribution on heat transfer processes and heat exchangers efficiency

Daniel Bodu. Admiral Makarov's National University of Shipbuilding

Abstract. *The paper substantiates the formulation of the task for research, the purpose of which is to increase the efficiency of low-potential heat transfer from the surface of the regenerative heat exchanger due to the temperature distribution in the phase transition processes.*

Keywords: *phase transition, heat pipes, low-grade heat recovery, heat transfer.*

УДК 621.4

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В СУДНОВИХ ДВИГУНАХ

Д. М. Мелех, PhD, асистент¹

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

¹ dmelekh94@gmail.com

Анотація. Розглянуто основні напрями переходу морської енергетики на альтернативні джерела палива, зокрема водень. Проаналізовано технічні переваги, екологічні аспекти та поточні виклики впровадження водневих паливних систем у суднових двигунах. Наведено короткий огляд сучасних технологій і досліджень у цій сфері.

Ключові слова: водень, судновий двигун, альтернативне паливо, викиди, енергоефективність.

Вступна частина. Світова морська галузь перебуває у процесі переходу до більш екологічно сталих видів енергетики. Стратегія Міжнародної морської організації до 2050 року передбачає скоротити викиди CO₂ в судноплаванні щонайменше на 40 % до 2030 року, прагнучи досягти цього показника на 70 % до 2050 року порівняно з 2008 роком [1]. Тому актуальним напрямом є пошук альтернатив традиційним викопним видам палива. Одним із найбільш перспективних енергоносіїв є водень, який має нульові викиди CO₂ при згорянні та високу питому енергію.

Ціль роботи – аналіз сучасного стану та перспектив застосування водневого палива у суднових двигунах, з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів

Основна частина. Використання водню в суднових двигунах розглядається сьогодні як один із ключових напрямів переходу морського транспорту до екологічно чистих джерел енергії. Технологічно це може бути реалізовано двома основними способами: шляхом модифікації традиційних двигунів внутрішнього згоряння для роботи на водні або через застосування паливних елементів, які забезпечують пряме перетворення хімічної енергії водню в електричну без процесу згоряння. У першому випадку водень може подаватися у вигляді стисненого газу або у зрідженому стані, що потребує використання спеціальних криогенних резервуарів та систем високого тиску. Такі рішення дозволяють частково зберегти звичну архітектуру суднових енергетичних установок, однак вимагають модернізації паливної системи, систем охолодження та контролю займання.

Основна перевага водневого палива полягає в його нульових викидах – під час згоряння утворюється лише водяна пара. Воно має високу енергетичну щільність, тому забезпечує більше енергії на одиницю маси, ніж традиційне паливо, що дозволяє створювати компактніші та ефективніші суднові двигуни. Водень може зберігатися у зрідженому стані при температурі

близько $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ або у вигляді хімічних сполук. Його отримують із природного газу або електролізом за допомогою сонячної й вітрової енергії, що робить його одним із найчистіших видів палива з нульовими викидами парникових газів. Найефективнішими установками для перетворення водню в енергію є паливні елементи [2], проте висока вартість виробництва й обладнання поки що обмежує широке застосування цієї технології. Для досягнення цілей скорочення викидів до 2050 року необхідно не лише перевести флот на екологічне паливо, а й впровадити нові технології для зменшення парникових газів від суден. Водень розглядається як одне з основних рішень для декарбонізації морського транспорту, проте його застосування супроводжується технічними та економічними труднощами. Цикл виробництва відновлюваного водню включає етапи отримання, зберігання та використання цього енергоносія (рис. 1).



Рисунок 1 – Виробництво відновлювального водню (джерело Renewable Hydrogen) [2]

Морська галузь відповідає за значну частину світових викидів парникових газів, і скорочення її вуглецевого сліду стало нагальним питанням. Водневі паливні елементи стали перспективною альтернативою традиційним морським рушійним системам, пропонуючи потенціал для значного скорочення викидів парникових газів та підвищення енергоефективності.

Однією з технологій, яка стала перспективною альтернативою традиційним морським рушійним системам, є водневі паливні елементи. Паливні елементи – це електрохімічні пристрої, які перетворюють хімічну енергію водню та кисню на електроенергію, тепло та воду. Використання водневих паливних елементів у морському застосуванні має потенціал для зменшення викидів парникових газів та підвищення енергоефективності [3].

В роботі [4] дослідили основний принцип водневих паливних елементів. Основним принципом водневого паливного елемента є перетворення хімічної енергії, що зберігається у водневому паливі, в електричну енергію за допомогою електрохімічного процесу. Цей процес включає реакцію водневого палива з киснем з повітря для виробництва електроенергії, тепла та води як єдиного побічного продукту (рис. 2). Цей процес є високоефективним, оскільки він дозволяє уникнути теплової неефективності, пов'язаної з традиційними двигунами внутрішнього

згоряння, які перетворюють хімічну енергію на тепло, що, у свою чергу, приводить в дію турбіну для вироблення електроенергії.

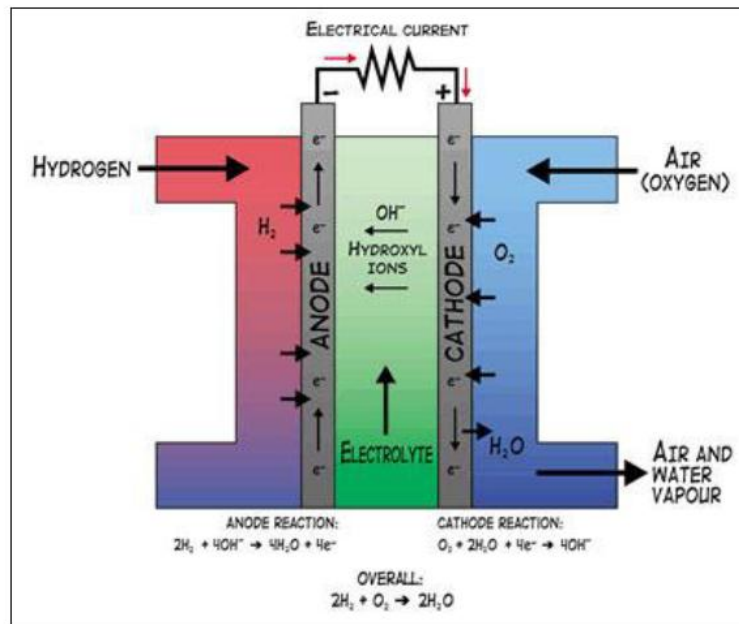


Рисунок 2 - Основний принцип роботи паливних елементів на водні [4]

Однією з головних переваг використання водневих паливних елементів у морському застосуванні є їхній вплив на навколишнє середовище. Водневі паливні елементи виробляють електроенергію, поєднуючи водень та кисень, причому єдиним побічним продуктом є вода. Це означає, що немає викидів парникових газів чи інших шкідливих забруднювачів, що може допомогти зменшити вуглецевий слід судноплавної галузі [5].

Ще однією перевагою водневих паливних елементів є їхня енергоефективність. Паливні елементи мають вищу ефективність порівняно з традиційними морськими рушійними системами, що означає, що для виробництва тієї ж кількості енергії потрібно менше палива. Це призводить до зниження споживання палива та експлуатаційних витрат для судноплавних компаній, що може бути значним, враховуючи високе споживання палива морськими суднами [6].

Окрім екологічних та економічних переваг, використання водневих паливних елементів також може покращити енергетичну безпеку та зменшити залежність від викопного палива. Викопне паливо піддається волатильності цін та перебоям у ланцюжку поставок, що може мати значні економічні та логістичні наслідки для судноплавної галузі. Використовуючи водень як джерело палива, галузь може зменшити свою залежність від викопного палива та покращити енергетичну безпеку.

Однак, існують також значні труднощі, пов'язані з впровадженням водневих паливних елементів для морських застосувань. Однією з основних проблем є технічні та логістичні аспекти

виробництва, зберігання та розподілу водню. Водень вимагає спеціалізованих об'єктів для обробки та зберігання. Розробка мережі для виробництва, зберігання та розподілу водню, включаючи інфраструктуру, необхідну для транспортування та зберігання водню на судах, є значним викликом, який вимагає значних інвестицій та технологічного прогресу [7–8].

Ще однією проблемою є проблеми безпеки, пов'язані з використанням водневих паливних елементів у морських застосуваннях. Водень потребує спеціальних заходів безпеки для забезпечення безпечного поводження, зберігання та транспортування. Це включає розробку протоколів та стандартів безпеки, а також спеціалізоване навчання персоналу, який працюватиме з водневими паливними елементами.

Незважаючи на ці труднощі, було проведено кілька успішних демонстрацій технології водневих паливних елементів у морських застосуваннях. Наприклад, у 2018 році в Норвегії було спущено на воду пасажирський пором на паливних елементах, який став першим у своєму роді у світі. Пором під назвою MF Hydra (рис. 3) має місткість 299 пасажирів, для забезпечення роботи він споживає приблизно три тонни рідкого водню кожні три тижні, який зберігається у резервуарах об'ємом 80 м³. Робоча швидкість порома становить близько 9 вузлів (приблизно 16,7 км/год) [9].



Рисунок 3 – Пором під назвою MF Hydra [9]

Ще однією успішною демонстрацією технології водневих паливних елементів у морському застосуванні є Energy Observer (рис. 4), катамаран, який працює на водневих паливних елементах та сонячних панелях. Судно здійснює навколосвітню подорож, яка розпочалася у 2017 році, і має на меті продемонструвати потенціал технології водневих паливних елементів для морської галузі [10].

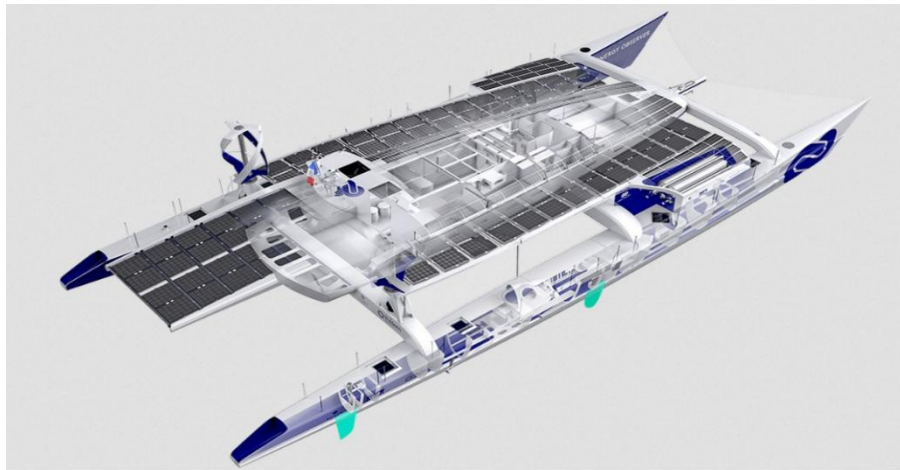


Рисунок 4 – Катамаран Energy Observer [10]

В роботі [11] було досліджено і запропоновано для максимальної мінімізації витрат використовувати водень для існуючих дизельних двигунів. Запропонований двигун працюватиме з безпосереднім впорскуванням водню в циліндри (рис. 5). Для початку процесу згоряння знадобляться низькоенергетичні іскри, щоб уникнути використання великої кількості дизельного палива.

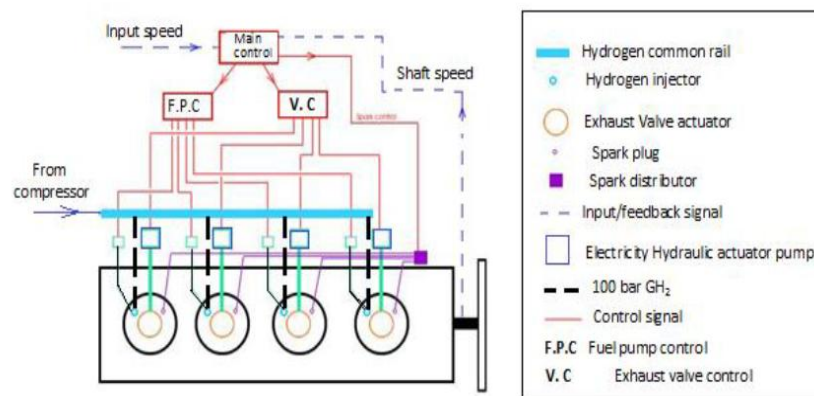


Рисунок 5 – Схематична система керування двигуном [11]

Паливні насоси та іскри повинні мати електронне керування (безкульшові двигуни), щоб забезпечити оптимальну продуктивність за різних умов експлуатації (рис. 6).

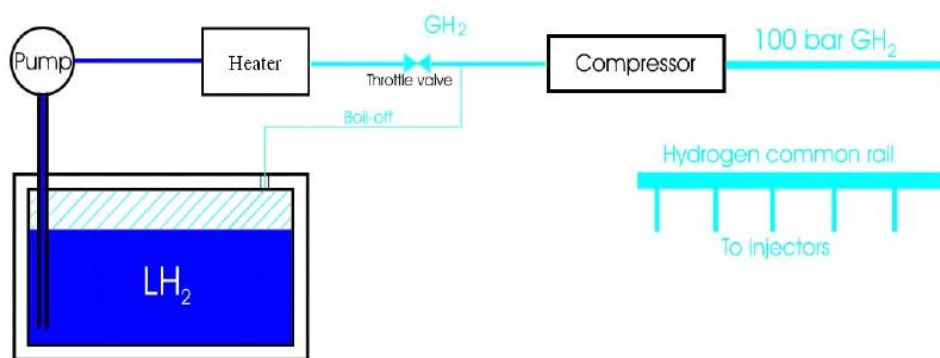


Рисунок 6 – Воднева паливна система [11]

Також було проведено дослідження присвячене модернізації судна RO/RO «Таб», що курсує у Середземному морі, із дизельних двигунів на воднево-енергетичну установку. Початково судно оснащено двома дизельними двигунами M32C потужністю по 2700 кВт. Автори порівняли два варіанти роботи двигуна на водні: 1) попереднє змішування водню з повітрям перед подачею у циліндри; 2) безпосереднє упорскування водню після стиснення. Аналіз проводився для 2-тактного та 4-тактного циклів за моделлю Отто. Встановлено, що найкращі результати забезпечує двотактний двигун з безпосереднім упорскуванням водню, оскільки він дає вищий тиск і стабільніше згоряння без вибухових коливань. У ході розрахунків потужність двигуна залишилась тією самою – 2700 кВт, але тепловий ККД знизився з 47 % (дизель) до $\approx 29,6$ % (водень). Питома витрата палива зменшилась до 93,46 г/кВт·год, завдяки високій теплотворній здатності водню (≈ 130 МДж/кг). Тиск згоряння і стиснення майже не відрізнялись від дизельного двигуна. Через меншу щільність водню необхідні більші об'єми паливних баків: для 8-денної подорожі потрібно приблизно 1492 м³ LH₂, що більш ніж удвічі перевищує об'єм дизельних баків (≈ 707 м³). Тому дослідники пропонують збільшити об'єм паливних танків або інтегрувати їх у двопалубний простір (рис. 7).

	Hydrogen	M32C
Engine speed (r.p.m)	775	600
Pressure ratio	9	12.8
Heating value of fuel (MJ/kg)	130	42.7
Bore (cm)	32	32
Stroke (cm)	42	42
Engine power (kW)	2700	2700
Thermal efficiency (%)	29.57	47
Specific fuel consumption (g/kW.hr)	93.46	178.98
No. of cylinders	6	6
Mean effective pressure (bar)	10.02	25.9
Compression pressure (bar)	75.57	84
Combustion pressure (bar)	132.4	124

Рисунок 7 – Порівняння характеристик водневого двигуна та дизельного двигуна M32C [11]

Визначено, що технологічно можлива заміна дизельного двигуна на водневий без зменшення потужності, проте знижується ККД і зростають вимоги до простору під зберігання палива. Головні виклики: низька густина LH_2 , великий об'єм баків, вартість переобладнання та потреба у системах охолодження і безпеки. Попри це, результати підтверджують реалістичність застосування водню як палива для суднових ДВЗ за умови адаптації конструкції судна.

У якості напрямів подальших досліджень пропонуємо зосередитись на вивченні можливостей адаптації існуючих суднових двигунів під використання водню або воднево-дизельних сумішей, а також на аналізі економічної доцільності впровадження таких технологій. Перспективним є проведення лабораторних випробувань моделей паливних елементів та систем зберігання водню у спрощеному форматі, що дозволить оцінити потенціал їх застосування у вітчизняному суднобудуванні.

Висновки. 1. Проаналізовано, що водневе паливо має значний потенціал для застосування у суднових енергетичних установках як екологічно чиста альтернатива традиційним видам палива. 2. Визначено, що широке впровадження водневих технологій у морській галузі на сучасному етапі стримується високою вартістю виробництва, складністю зберігання та відсутністю належної інфраструктури. 3. Запропоновано зосередитись на адаптації існуючих двигунів до використання водню або змішаних палив, а також на оцінці економічної доцільності та практичних умов впровадження таких технологій у вітчизняному суднобудуванні.

Список літератури

- [1] International Maritime Organization (IMO). (2023). *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. Retrieved from <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx>
- [2] Melnyk, O. M., Shumylo, O. M., Onishchenko, O. A., Mykhailova, I. V., Obniavko, T. S., & Korobko, T. O. (2023). *Concept and prospects for the use of hydrogen fuel in maritime transport. Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 96-105.
- [3] Ahmed, H., Adebayo, P., Ahmed, M., & Arbab, I. (2023). Hydrogen fuel cell technology: Benefits, challenges and future potential. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 13(1), 6.
- [4] Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981–989.
- [5] Al Hosani N, Fathelrahman E, Ahmed H, Rikab E. (2023). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for decentralized grey water treatment: Technical, ecological, and cost efficiency comparison for domestic applications. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, (Vol. 34), 1-12.
- [6] McConnell, V. P. (2010). Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells. *Fuel Cells Bulletin*, (5), 12–17.
- [7] Ahmed, H., Gallegos, E. (2022). Human-systems integration of agricultural machinery in developing economy countries: Perceptions of adoption. *INCOSI International Symposium*, 32, 18–28.
- [8] Vogler, F., & Würsig, G. (2011). Fuel cells in maritime applications: Challenges, chances and experiences. *Proceedings of the International Conference on Hydrogen Safety*, No. 96, 1-13.
- [9] Ukrainian Shipping Magazine. (2023). Норвегія запустила перший пором на водневому паливі. Retrieved from <https://usm.media/norvegiya-zapustila-pershij-porom-na-vodnevomu-palivi/>
- [10] Ecotechnica. (2017). «Зелений» катамаран Energy Observer готується у навколосвітню подорож. Retrieved from <https://ecotechnica.com.ua/uk/transport/zelenyj-katamaran-energy-observer-gotovitsya-v-krugosvetnoe-puteshestvie>
- [11] Seddiek, I. S., Elgohary, M. M., & Ammar, N. R. (2015). The hydrogen-fuelled internal combustion engines for marine applications with a case study. *Brodogradnja*, 66(1), 23–38.

Melekh D.

In this study, the main directions of the maritime energy transition to alternative fuels, particularly hydrogen, have been examined. The technical advantages, environmental aspects, and current challenges of implementing hydrogen fuel systems in marine engines are analyzed. A brief overview of modern technologies and research in this field is presented.

Keywords: hydrogen; marine engine; alternative fuel; emissions; energy efficiency.

УДК 621.577:661.53

АМІАК ЯК АЛЬТЕРНАТИВНЕ ПАЛИВО ДЛЯ МОРСЬКИХ СУДЕН: ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ТА ВИКЛИКИ

Андрєєв А. А.,

канд. техн. наук,

доцент кафедри теплотехніки

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

artem.andreev@nuos.edu.ua

Андрєєва Н. Б.,

канд. пед. наук,

доцент кафедри теплотехніки

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

natalia.andrieieva@nuos.edu.ua

Олійник О. О.,

здобувач вищої освіти, гр. 2217

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

alexandroleinik432@gmail.com

Анотація: У статті розглянуто перспективи використання аміаку (NH_3) як альтернативного безвуглецевого палива для морських суден. Проаналізовано його екологічні переваги, технічний стан розробок, пілотні проекти та виклики впровадження. Показано, що аміак дозволяє практично повністю усунути викиди CO_2 і SO_x , а також зменшити NO_x на 40–50 % порівняно з мазутом. Визначено основні напрями розвитку технологій, інфраструктури та регулювання, необхідні для переходу до «зеленого» судноплавства.

Ключові слова: аміак, альтернативне паливо, морські судна, декарбонізація, екологічність, NO_x , IMO.

Зміна палива – ключовий фактор декарбонізації морського транспорту. Сучасні морські судна здебільшого використовують мазут (низько- та високосірчисті) і зріджений природний газ (LNG), що породжують значні викиди CO_2 , NO_x і SO_x . За даними Міжнародної морської організації (IMO), викиди парникових газів від судноплавства мають бути зменшені щонайменше на 20 % до 2030 р. і досягти нульового рівня за життєвим циклом до 2050 р., порівняно з рівнем 2008 р. [1]. З огляду на це, аміак (NH_3) розглядається як одне з перспективних

«чистих» палив, оскільки не містить вуглецю і при згорянні безпосередньо не генерує CO_2 [2]. Водночас слід оцінити імовірне зменшення викидів інших забруднювачів (NO_x , SO_x) порівняно з традиційними видами пального, а також вирішити питання безпеки, інфраструктури та нормативного забезпечення. Нижче розглянуто ці аспекти: порівняно екологічні характеристики аміаку та інших суднових палив, технічний стан технологій, дослідницькі ініціативи і пілотні проєкти, а також ключові гравці і країни в цій галузі.

Аміак як паливо для суден

Аміак – простий азотний водень (NH_3) – не містить вуглецю. На борту судна він транспортується і застосовується як скраплений при -33°C (або високому тиску $\sim 15\text{--}20$ бар) рідкий аміак. Теплотворна здатність аміаку відносно невелика: $\approx 18,6$ МДж/кг (нижче за дизель в $\sim 2,4$ раза) і $\approx 12,7$ МДж/л. Через низьку енергетичну щільність амікові судна потребуватимуть більших цистерн палива або частішого бункерування.

Натомість при спалюванні аміаку в двигуні або енергетичній установці утворюються лише азот і вода, тобто CO_2 не виділяється взагалі [2]. Такий «нульовий» викид вуглецю на борту робить аміак привабливим для досягнення цілей ІМО з чистого вуглецевого балансу. Важливо зазначити, що повна «зеленість» аміаку визначається методом його виробництва: синтез з відновлюваної енергії («зелений аміак») має майже нульовий вуглецевий слід, тоді як традиційний «сірий» аміак з природного газу містить $1,6\text{--}2$ т $\text{CO}_2/\text{т NH}_3$ (близько $86\text{--}107$ кг CO_2/GJ) [3]. Проте навіть «сірий» аміак при спалюванні не створює CO_2 , на відміну від мазуту ($\approx 74\text{--}81$ кг/GJ) і метанолу ($\sim 69,8$ кг/GJ) [4].

Безкарбоновість аміаку супроводжується іншими особливостями: він не містить сірки, тому викиди SO_x при згорянні мінімальні (близькі до нуля) [5, 6]. Аміак також не утворює сажі чи CO , на відміну від вуглецевих палив. Однак азот у аміаку може перетворюватися на оксиди азоту (NO_x) або N_2O . Згідно з останніми випробуваннями двигунів, амікові двотактні та чотиритактні двигуни демонструють значно нижчі NO_x -викиди, ніж при роботі на мазуті – приблизно на $40\text{--}50\%$ менше. Для досягнення нормативів ІМО Tier III в окремих випадках застосовують додаткові системи селективного каталітичного відновлення, але вони можуть бути меншими, ніж для дизельних двигунів. Нітрозні оксиди (N_2O) в тестах виявилися надзвичайно низькими – на рівні декількох ppm, що дає не більше $\sim 1\text{--}2\%$ CO_2 -еквівалентних викидів від повного викиду CO_2 мазуту. Використання каталітичних технологій після камери згоряння дозволить ще більше зменшити такі $\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$ -фракції. Таким чином, з точки зору шкідливих емісій, аміак забезпечує майже повне виключення SO_x і суттєве (близько вдвічі) скорочення NO_x порівняно з традиційним нафтовим паливом, практично вирішуючи питання CO_2 .

Екологічний вплив: CO_2 , NO_x , SO_x

Порівняємо очікувані викиди ключових забруднювачів при використанні різних палив (одиниці – г на один GJ викидаємого палива). Нагадаємо, що спалювання «чистого» аміаку не створює CO_2 , а CO_2 -викид морського дизеля (MGO) і мазуту (HFO/VLSFO) становить близько

75–81 кг/GJ [2]. Для LNG (метану) CO₂-емісія близько 55–56 кг/GJ (бо 1 кг CH₄ дає ~2,75 кг CO₂, LHV ~50 MJ/kg). Метанол виробляє близько 1,37 кг CO₂/кг (~69,8 кг/GJ) при згорянні. Аміак же, будучи безвуглецевим, дає практично 0 кг CO₂/GJ на виході двигуна.

Таблиця 1 ілюструє співставлення викидів. Тут за базу взято екологічний вплив мазуту (важкого палива), умовно прийнятого за 100 % у NO_x- та SO_x-емісіях. Враховано, що за регламентом VLSFO містить до 0,5 % сірки, MGO – до 0,1 %, LNG/метанол/аміак – 0 %.

Таблиця 1 – Очікуваний вплив на довкілля різних палив (викиди на одиницю енергії)

Паливо	CO ₂ (кг/GJ)	NO _x (% від HFO)	SO _x (% від HFO)	Коментарі
Мазут (VLSFO)	≈81,2	100 %	100 % (до 0,5 % S)	Базове порівняння
Дизель (MGO)	≈74,7	≈80–90 %	≈14 % (0,1 % S)	Менше CO ₂ і SO _x , трохи менше NO _x
LNG (CH ₄)	≈55–56	≈8 %	0 %	Значне зменшення NO _x , SO _x
Метанол	≈69,8	≈50–60 %	0 %	Менша NO _x , немає сірки
Аміак (NH ₃)	0	≈50%	0%	Практично відсутні CO ₂ , SO _x ; значне зменш. NO _x

З табл. 1 видно, що аміак є майже «чистим» за CO₂ і SO_x: його використання забезпечує 100%-ве скорочення викидів цих двох видів забруднювачів на кораблі. Емісії NO_x при спалюванні аміаку, попри наявність азоту в паливі, суттєво менші, ніж у мазуту – приблизно на 40–50 %, а з SCR-системою їх легко довести до вимог IMO Tier III. Аналогічно, LNG зменшує викиди NO_x приблизно на 90 % [6] і майже виключає SO_x, але все ж продукує CO₂. Метанол зменшує NO_x і практично не містить S, але при повній заміні традиційного пального зберігає помітний CO₂-футпринт. Таким чином, екологічні показники аміаку суттєво кращі за нафтові: практично відсутній SO_x та CO₂, а NO_x у два рази нижчий.

Технологічний стан та пілотні проєкти

Стан розробки аміакових технологій поступово дозріває. За оцінками DNV, станом на кінець 2025 р. у світі замовлено близько 39 суден, здатних працювати на аміаку (переважно газовози та балкери). Перші такі судна очікуються до введення в експлуатацію вже у 2026–2027 роках. Виробники двигунів активізували розробки: наприклад, компанії WinGD (Швейцарія) і Japan Engine Corp. (Японія) успішно тестують двотактні аміакові двигуни, а MAN Energy

Solutions і південнокорейська Hyundai Heavy Industries розробляють відповідні чотиритактні моделі (серія HiMSEN). Згідно з публікацією Ammonia Energy, результати стендових випробувань показують, що аміакові двигуни без допоміжної очисної системи відповідають нормам IMO Tier II, а з SCR – можуть витримати Tier III [6]. Ефективність таких двигунів «в аміаковому режимі» порівнянна з традиційною, і додаткового зниження потужності не очікується.

Вже проведено кілька демонстраційних проєктів. Так, у Японії компанія NYK та суднобудівник IHI Power Systems 2024 р. спустили на воду перше аміак-двигкове буксирне судно «Sakigake», а до 2026 р. завершується будівництво газовоза NYK на аміаку. Mitsui O.S.K. Lines (MOL) разом з Yara International організували у 2024 р. першу в історії операцію судно–судно (STS) з передачі аміаку в порту Дамп'єр (Австралія) – 2 рази по 4 000 м³ між двома газовозами, відпрацювавши процедуру бункерування на якірній стоянці. Аналогічні досліді плануються в Азії (Сінгапур, Корея) та Європі. Наприклад, 12 квітня 2025 року в Роттердамі відбувся перший пілот з бункерування рідкого аміаку (800 м³ при –33 °C) між двома суднами. У цьому експерименті перевірялось реагування на витіки та узгоджувались технічні процедури – жодних викидів аміаку не зафіксовано. За результатами випробувань порт Роттердам досяг готовності до бункерування аміаку на першому рівні (Port Readiness Level 7), планується передача отриманих знань до інших портів ЄС.

У Сінгапурі наприкінці 2025 р. консорціум Sumitomo Corporation, Keppel і Advorio отримав державне фінансування на створення повного ланцюжка поставок «зеленого аміаку» для судноплавства і реалізацію демонстрації бункерування в 2027 р. (за підтримки Maritime & Port Authority) [6]. У 2023 р. для проєкту «Зелений коридор» між Південною Кореєю та США (Green Shipping Corridor) було обрано корейські порти Пусан і Ульсан як логістичні центри, де передбачається розбудова інфраструктури для аміаку і метанолу. Ульсан також планує добудову терміналів для бункерування біоаміаку та водню. Загалом приватні та державні ініціативи схиляються до «пілотного» впровадження аміаку у 2025–2030 роках, з поступовим масштабуванням після 2030 р. у міру здешевлення відновлюваної електроенергії і зростання попиту.

Безпека, інфраструктура та регуляторика

Перехід на аміак потребує вирішення ряду викликів. Аміак – сильний токсин з характерним запахом (порогова чутність $\approx 5\text{--}50$ ppm) і може викликати опіки при прямому контакті. Для зберігання рідкого аміаку потрібні спеціальні термоізовані резервуари (–33 °C при атмосферному тиску або при 15–20 бар) з подвійними стінками та вентиляцією. У портах і на судах потрібне обладнання для постійного моніторингу концентрації аміаку в повітрі, системи огорожі в разі витоків та індивідуальні протигазу. Втім, сильний запах допомагає швидко виявити витік, що полегшує контроль. Бездоганність систем та процедур уже

підтверджено пілотами: наприклад, у ротордамському випробуванні жоден грам аміаку не потрапив у атмосферу.

Інфраструктура аміакового бункерування наразі відстає від LNG. Хоча аміак є гігантським хімічним товаром (є розповсюджена логістика для добрив і промислових потреб), його вживання на судах вимагає окремих терміналів, трубопроводів і танкерів. Станом на 2025 р. існує лише кілька випробувальних установок: наприклад, у портах Роттердаму, Сінгапуру, Ульсана готують аміакові термінали і баржі. Побудова повноцінної мережі бункерних станцій потребує значних інвестицій. За оцінками DNV, аміак наразі в ~2–4 рази дорожчий за мазутний еквівалент енергії, тому економічний імпульс прийде після зменшення вартості зеленого водню і жорсткої політики щодо вуглецевих емісій.

Регуляторна база теж розвивається. Світові класифікаційні товариства (DNV, ClassNK, LR тощо) вже запровадили тимчасові норми для аміакових паливних систем, а у 2024 р. ІМО оприлюднила попередні керівництва (Interim Guidelines) з безпечного бункерування аміаку. Однак для остаточного легалізованого застосування на комерційних судах потрібно внести зміни до Кодексу IGF (для газоподібних паливних), що очікується не раніше початку 2030-х років [1]. Наразі усі паливні установки на метанолі та аміаку формально розглядаються як експериментальні. Міжнародні організації визнають токсичність і корозійну небезпеку аміаку, тому готують суворі правила: наприклад, дозвільні концентрації в приміщеннях мають бути на рівні десятків ppm [2]. Враховуючи це, галузь розвиває програми навчання екіпажів, що відпрацьовують дії при витіках, і спільні проєкти щодо безпеки. На сьогоднішній день жоден з проведених пілотів або досліджень не виявив непереборних «завалів» у безпеці аміакових установок; проте цей аспект залишається критичним викликом для масового впровадження.

Перспективи комерційної реалізації

З огляду на екологічні потреби та технічний прогрес, аміак-двигуни здатні вийти на ринок у найближче десятиліття. За сценаріями консалтингових агентств, перші комерційні контракти на будівництво нових суден з аміаковими двигунами підписуються вже у середині 2020-х, а у 2030–2040-х роках можна очікувати масове нарощування флоту. На думку експертів, аміак (як і метанол) є одним з небагатьох «масштабованих» безвуглецевих палив: його виробляють у великих обсягах (резерви установок Haber-Bosch у світі становлять мільйони тон на рік) і з'єднання азоту та водню (перш за все «зеленого» водню) дозволяє синтезувати його глобально.

Однак існує багато невизначеностей: економічний бар'єр наразі дуже високий (безпосередньо витрати на паливо можуть бути удвічі вищими за традиційні), ймовірно буде потрібна низка стимулів або зовнішньої ціни на вуглець. Також тривожить потенційна конкуренція за «зелений водень» між секторами енергетики. Проте у випадку реалізації глобальних «зелених коридорів» торгівлі (за ініціативою урядів Півд. Кореї, США, Норвегії та ін.) аміак може закріпитися як стратегічний корабельний енергоносіє.

Висновки

Аміак як суднове паливо пропонує значні екологічні переваги: при правильному синтезі (з відновлюваної енергії або з CCU) він дозволяє майже на 100% виключити CO₂- і SO_x-викиди та знизити NO_x приблизно на половину, порівняно з нафтовими видами палива [1, 2]. Це відкриває шлях до цілей ІМО щодо нейтралізації вуглецю у суднопластві. Наразі триває активний розвиток технологій: двигуни знаходяться на фінальному етапі доведення, пілотні проєкти підтверджують безпечність і технологічну здійсненність застосування аміаку. Проте широкомасштабний перехід уповільнює висока вартість «чистого» аміаку, а також необхідність істотних інвестицій в інфраструктуру та регуляторні зміни. Головними рушіями цього процесу виступають Японія та Корея (девелопери двигунів і суден), транзитні порти Азії та Європи, а також великі торговельні компанії (Trafigura, Peninsula та ін.). Успіх аміаку як суднового палива залежатиме від співпраці між виробниками «зеленого» водню, суднобудівниками, судновласниками і регуляторами. Якщо ці зусилля об'єднуються, до 2030–2035 рр. аміак може стати одним з основних опцій для декарбонізації морського транспорту.

Література

1. International Maritime Organization. *IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. London: IMO, 2018.
2. European Commission. *Fit for 55 Package: Reducing Emissions from Maritime Transport*. Brussels: EC, 2021.
3. Heim, K. "Existing and Future Demands on the Turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines." *Proceedings of the 8th Supercharging Conference*, Dresden, October 2002.
4. MAN B&W Diesel A/S. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation*. Copenhagen: MAN Diesel A/S, 2005.
5. RightShip & StormGeo. *Just-in-Time Arrival: A Guide to Reducing Port Emissions*. London: RightShip Report, 2022.
6. IMO. *Maritime Energy Efficiency Measures: EEXI and CII Guidelines*. London: IMO, 2023.

Ammonia as an Alternative Marine Fuel: Environmental Benefits and Challenges

Andriev A.A., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Andrieva N.B., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Oliinyk O., higher education student, Kherson Educational and Research Institute, Admiral
Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Abstract: The paper analyzes the potential of ammonia (NH₃) as a carbon-free alternative fuel for marine vessels. Its environmental advantages, current technological developments, pilot projects, and implementation challenges are discussed. Ammonia combustion produces no CO₂ or SO_x emissions and reduces NO_x by approximately 40–50% compared to heavy fuel oil. The study outlines the main directions for technological, infrastructural, and regulatory development required for the transition toward green shipping.

Keywords: ammonia, alternative fuel, marine vessels, decarbonization, environmental impact, NO_x, IMO.

УДК 621.43

АНАЛІЗ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Андрєєв А. А.,*канд. техн. наук,**доцент кафедри теплотехніки**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***artem.andreev@nuos.edu.ua****Андрєєва Н. Б.,***канд. пед. наук,**доцент кафедри теплотехніки**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***nataliia.andrieieva@nuos.edu.ua****Тукасер Д. Д.,***здобувач вищої освіти, гр. 4217ст**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету**кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***tukaserd42@gmail.com**

Анотація:

У статті розглянуто сучасні системи утилізації теплоти (WHR) суднових малообертових дизелів. Проаналізовано основні джерела відпрацьованого тепла, ефективність економайзерних, парових і ORC-схем, а також досвід провідних виробників – *MAN Energy Solutions*, *Wärtsilä* та *Alfa Laval*. Показано, що впровадження WHR-систем дозволяє підвищити загальний ККД енергетичних установок до 80–90 %, знизити споживання палива на 5–15 % і суттєво скоротити викиди CO₂.

Ключові слова: утилізація теплоти, WHR, суднові дизелі, ORC, енергоефективність, MAN, Wärtsilä, Alfa Laval.

Вступ

Суднові малообертові двотактні дизельні двигуни, що широко використовуються у морському флоті, мають високий рівень питомої потужності, проте тільки частина енергії палива перетворюється на механічну роботу. Решта теплової енергії відводиться від двигуна різними контурами охолодження та вихлопними газами. Високі ціни на паливо, жорсткі міжнародні екологічні норми (наприклад, вимоги ІМО за індексом енергоефективності EEDI) та прагнення знизити викиди CO₂ стимулюють впровадження систем утилізації відпрацьованого тепла (Waste Heat Recovery Systems, WHRS). Дослідження показують, що застосування WHRS може забезпечити економію палива до 10% за рахунок перетворення теплових втрат у корисну енергію [1]. Ефективне використання надлишкового тепла суднових дизелів сприяє зниженню питомої витрати палива, зниженню викидів шкідливих речовин і покращенню експлуатаційних

характеристик судна. Ця стаття систематизує сучасні типи систем утилізації теплоти на кораблях, їх ефективність та перспективні тенденції розвитку.

Суднові малообертові дизелі та джерела відпрацьованого тепла

Морські малообертові двотактні дизелі працюють з надзвичайно високими тисками та характеризуються великими ходами поршнів, що забезпечує їхню надійність і ККД. Проте лише близько 40–50 % енергії палива перетворюється на корисну механічну роботу. Основні носії теплоти, що відводиться від двигуна, включають теплоту вихлопних газів, охолоджувальної рідини (водяної сорочки), випускного повітря (охолоджувач наддувного повітря) та мастила. За даними огляду, 15–25 % тепла від камери згоряння відбирається водою сорочки при температурі 70–90 °C [2]. Охолоджувач наддувного повітря знижує температуру зарядного повітря до $\approx 40\text{--}50$ °C [3], також поглинаючи значну частину енергії. Значні теплові втрати відбуваються через гарячі вихлопні гази, температура яких може перевищувати 400–500 °C. У сукупності через охолоджувальну систему і випускні гази генерується більшість надлишкового тепла двигуна [3, 4]. Зазвичай без рекуперації це тепло відводиться у навколишнє середовище або море. Для підвищення загальної ефективності суднової енергосистеми важливо використовувати цю надлишкову теплоту для виробництва пари чи електроенергії на борту [4–6].

Ефективність схем утилізації теплоти

Ефективність систем WHR залежить від температури джерела тепла, конструкції схеми та режиму роботи двигуна. У простих економайзерних схемах (паралельно з основним котлом) приріст ККД двигуна невеликий, проте досягається швидке повернення капіталовкладень. Наприклад, Alfa Laval зазначає, що установка модуля Aalborg Micro може дати до 25 % економії палива на котлі-утилізаторі з окупністю 1–2 роки [7–9]. Складні комбіновані системи забезпечують вищий абсолютний приріст: у проєкті Maersk додаткові 6 МВт від WHR склали близько 11 % від електричної потужності головного двигуна.

Моделі MAN Diesel показують, що підключення турбогенератора дозволяє збільшити вихідну потужність установки на 3–5 % від номінальної без погіршення роботи двигуна [6]. Аналізи ORC-систем приходять до аналогічних висновків: у наведеному огляді MDPI зазначено, що впровадження ORC може підвищити загальний ККД суднового енергоблоку на 5–15 %. MAN і Orcan Energy на прикладі двигуна 18V48/60 демонструють +4 % ККД при оснащенні модулем ORC («Efficiency Pack»), що економить понад 1200 т палива на рік [6].

Загалом, сучасні системи WHR дозволяють підвищити «утилізаційну» ефективність енергоблоку (див. коефіцієнт використання тепла) часто до 80–90 % (відносно корисного енергетичного потоку двигуна). Наприклад, запропонована в одному дослідженні когенераційна система (steam+турбіна з регенерацією) продемонструвала сумарний ККД ≈ 48 % та коефіцієнт використання тепла 86 %, що свідчить про значний потенціал інтеграції теплових потоків.

Сучасні тенденції розвитку утилізаційних систем

Сучасні тренди в морській енергетиці пов'язані з цифровізацією та інтеграцією. Установки WHR все частіше оснащуються сенсорами та системами AI/IoT для оптимізації роботи в реальному часі. Технології «цифрового двійника» дозволяють моделювати енергетичну систему судна, прогнозувати ефект від модернізацій та здійснювати адаптивне керування тепловими потоками [11]. Це дає змогу автоматично регулювати обороти насосів, клапани обхідних потоків або режим роботи ORC-установок залежно від навантаження двигуна.

Ще одним напрямом є подальша інтеграція різних енергетичних підсистем. Крім ORC, розвиваються рішення по інтеграції WHR з системами охолодження, опалення паливних танкерів (потрібна тепла енергія для ПММ), гальванічними і радіонуклідними технологіями та гібридизацією з акумуляторами. Наприклад, надлишкова електроенергія WHR може заряджати батареї або живити щоглові силові агрегати (shaft generators) для плавного керування потужністю. Також вивчають застосування нагнітачів і теплових насосів для рекуперації низькотемпературного тепла охолодження.

Політичні й економічні умови також сприяють впровадженню WHR: міжнародні стандарти (EEDI, CII) та стимули (податкові кредити, субсидії) роблять проєкти з WHR дедалі привабливішими. Згідно з оцінками ІМО, вдосконалення ККД суден за рахунок утилізації тепла має допомогти скоротити викиди CO₂ від флоту до 50 % до 2050 року.

Порівняльний аналіз ринкових систем

На ринку представлено низку готових рішень від провідних виробників:

– MAN Energy Solutions: має серію TCS-PTG для двотактних дизелів, що забезпечує до 4.0–4.7 МВт додаткової генерації (для двохарочних двигунів з турбінами TCA/TCR) [6]. Також у MAN доступні модулі ORC (через партнерство з Orca Energy) – наприклад, «Efficiency Pack» для двигунів 18V48/60, що дає ≈ 4 % економії палива. Інші продукти – електронні системи управління економайзером (EEC) для оптимізації вироблення пари від вихлопу двигуна і зниження споживання допоміжного котла.

– Wärtsilä Corporation: надає інтегровані рішення, включаючи сучасні паросилові установки. Наприклад, їхній проєкт із Siemens на контейнеровозі «Gudrun Mærsk» продемонстрував, що поєднаний WHR (утилізаційний котел з двома тисками пара та турбіною) дозволяє отримувати до 12 % електроенергії від потужності головного двигуна [4, 5]. У сфері ORC Wärtsilä просуває систему Marine ECC разом з Turboden (маленький комбінований цикл ORC), даючи +8–12 % потужності двигуна [5]. Wärtsilä також розробляє цифрові рішення для моніторингу та інтеграції WHR у загальний енергобаланс судна (платформа Eniram/Brunvoll).

– Alfa Laval: спеціалізується на котлах-утилізаторах і ORC-модулях. Окрім Aalborg Micro та XW-TG економайзерів [7–9], компанія пропонує ORC-модуль E-PowerPack (до 200 кВт на модуль). Завдяки своїй компактності E-PowerPack можна встановлювати на судах з обмеженим простором, використовуючи теплоту водяної сорочки двигуна (≈ 80 °C) й одержувати постійну

електропотужність. Alfa Laval також активно просуває системи рекуперації теплоти в контексті зниження СН та CO₂-фондування суден.

Таблиця 1. Порівняння основних характеристик деяких ринкових систем

Компанія та Система	Тип системи	Додаткова потужність	Коментар
MAN Energy Solutions	TCS-PTG (Power Turbine Generator)	до ~4,7 МВт (TCS-PTG66)	Турбогенератор, підключається до двотактного двигуна.
	ORC Retrofit (Orcan Pack)	≈4% приросту ККД (MAN 18V48/60)	Модуль ORC на базі органічного Ренкіна.
Wärtsilä	Steam WHR (multi-P steam)	+6 МВт на двигун 68 640 кВт	Двофазний котел-утилізатор з паровою турбіною та Power Turbine.
	Marine ECC (ORC)	+8–12% до двигуна	Інтегрована система ORC для дизелів.
Alfa Laval	Aalborg Micro/Economizer	0.5–5 МВт парової потужності	Компактний котел-утилізатор для малих двигунів.
	Aalborg XW-TG (Economizer + Steam Turbine)	15–34 т/год пари (0.1–21 МВт)	Водотрубний котел-утилізатор для великих двигунів.
	E-PowerPack (ORC)	до 200 кВт (на модуль)	ORC-модуль для низькотемп. теплоносіїв.

Усі зазначені системи доводять свою ефективність на реальних проєктах. Наприклад, модуль ORC Alfa Laval вже встановлено на декількох суднах і показує швидку окупність завдяки економії палива [7–9]. Інтегровані системи MAN і Wärtsilä, хоч і мають вищу складність та капітальні витрати, можуть зменшити споживання палива на десятки відсотків від випускної теплової потужності.

Висновки

Утилізаційні системи теплоти судових малообертових дизелів є важливою складовою енергоефективності флоту. Традиційні економайзери та котли-утилізатори вже давно застосовуються для генерації пари й опалення, але новітні рішення (турбогенератори, ORC, комбіновані схеми) забезпечують істотний додатковий вихлоп електрики. Аналіз показує, що

впровадження WHR-систем дозволяє знизити питоме споживання палива кораблем на 5–15 % і більше [11], суттєво зменшивши викиди CO₂. Майбутнє належить комплексним підходам: цифрові системи керування і прогнозного обслуговування, інтеграція WHR з електричними мережами судна та альтернативними джерелами теплоти, такими як ORC. В сучасних умовах транспортної декарбонізації інвестиції у високоефективну утилізацію теплоти стають все більш виправданими.

Література

1. Miller, T., Durluk, I., Kostecka, E. та ін. Waste Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency // *Energies*, 2024, Vol. 17(22): 5653. DOI:10.3390/en17225653.
2. Kepekci, H., Ezgi, C. Thermodynamic Analysis of a Marine Diesel Engine Waste Heat-Assisted Cogeneration Power Plant Modified with Regeneration Onboard a Ship // *J. Mar. Sci. Eng.*, 2024, 12(9): 1667. DOI:10.3390/jmse12091667.
3. MAN Diesel & Turbo, *Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emission and EEDI*, Product brochure (MAN Diesel & Turbo TCS-PTG), 2012 (схеми та техн. характеристики).
4. Wärtsilä Corporation, *Environmental benefits and fuel savings successfully combined in practice*, Press Release (28 Sep 2005). (Проект інсталяції WHR на контейнеровозі, результати).
5. Wärtsilä Corporation & Turboden, *Wärtsilä Marine ECC (Organic Rankine Cycle) Launch*, Press Release (9 Sep 2010). (Введення ORC-рішень для морського сектора).
6. MAN Energy Solutions, *Press Release: MAN Energy Solutions and Orca Energy agree to collaborate* (5 Dec 2019). (Рішення по ORC «Efficiency Pack» для суднових дизелів).
7. Alfa Laval Aalborg, *Aalborg Micro – compact marine boiler/economizer*, Product Page. (Опис та технічні дані економайзера).
8. Alfa Laval Aalborg, *Aalborg XW-TG – water tube exhaust gas economizer with steam turbine*, Product Page. (Конфігурації та характеристики XW-TG).
9. Alfa Laval, *E-PowerPack – waste heat to power (ORC) solution*, Product Page. (ORC-модуль для суден).
10. MHI (Mitsubishi Heavy Industries), *Waste Heat Recovery Systems – STG (Steam Turbine Generator)*, Презентація 2016 (показники виробництва парових турбогенераторів на великих контейнеровозах).
11. Miller, T. et al., *Preprints.org* 2023–2024, Various studies on ship WHR (огляд тенденцій та цифр).

Analysis of Waste Heat Recovery Systems for Marine Low-Speed Diesel Engines

Andriev A.A., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
Andrieva N.B., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine
Tukaser D., higher education student, Kherson Educational and Research Institute, Admiral
Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Abstract: The paper examines modern Waste Heat Recovery (WHR) systems used in marine low-speed diesel engines. The study analyzes the primary heat sources, the efficiency of economizer, steam, and ORC configurations, and the technological solutions developed by *MAN Energy Solutions*, *Wärtsilä*, and *Alfa Laval*. It is shown that WHR systems can increase total plant efficiency up to 80–90%, reduce fuel consumption by 5–15%, and significantly lower CO₂ emissions, improving ship energy efficiency and sustainability.

Keywords: Waste heat recovery, WHR, marine diesel engines, ORC, energy efficiency, MAN, Wärtsilä, Alfa Laval.

УДК 621.438

**СУЧАСНІ ЗАСОБИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ (WHR) НА
МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ WÄRTSILÄ****Андрєєв А. А.,***канд. техн. наук,**доцент кафедри теплотехніки**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***artem.andreev@nuos.edu.ua****Андрєєва Н. Б.,***канд. пед. наук,**доцент кафедри теплотехніки**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***nataliia.andrieieva@nuos.edu.ua****Куделя П. М.,***здобувач вищої освіти, гр. 2227**Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,***Pashket20194@gmail.com****Анотація:**

У статті розглянуто сучасні системи утилізації теплоти (WHR) для малообертових дизельних двигунів фірми Wärtsilä, що забезпечують перетворення тепла вихлопних газів і охолоджувальних контурів у корисну енергію. Проаналізовано конструкцію та ефективність економайзерів, парових і газових турбін, а також ORC-блоків. Показано, що використання WHR-систем підвищує загальний ККД енергетичної установки до 90 %, зменшує споживання палива на 8–12% і скорочує викиди CO₂.

Ключові слова: утилізація теплоти, WHR, Wärtsilä, парова турбіна, ORC, енергоефективність судна.

У морській енергетиці до 50 % і більше енергії палива втрачається у вигляді тепла відпрацьованих газів та охолоджувальних систем [1]. Ефективне використання цих теплоносіїв (WHR) суттєво підвищує загальний ККД судна та знижує шкідливі викиди. Комбіновані енергетичні схеми (подібні до когенерації) демонструють, що при повному використанні усіх потоків тепла загальний ККД установки може сягати ~90 % [2]. Зокрема, економайзер (вторинний котел) на вихлопі двигуна генерує пару для парової турбіни, а додаткова турбогазова турбіна використовує надлишок тиску відпрацьованих газів [2, 3]. Така схема дає понад 10 % додаткової потужності від номінальної (додаткове електроживлення) і забезпечує економію палива до 10 % [2, 3].

Основні компоненти WHR-систем. Економайзер. Вловлює тепло вихлопних газів і виробляє пару для приводу турбіни. Наприклад, у системі WHR на першому у світі

14-циліндровому двигуні Wärtsilä RT-flex96C вихлопні гази проходять через економайзер, що генерує пару для турбогенератора [2].

Парова турбіна та турбогенератор. Пар з економайзера розширюється у турбіні і приводить в дію генератор, який виробляє електроенергію. Частина пари також може використовуватись для потреб опалення та технологічних процесів судна. У типових установках генератор поєднує два входи: від парової турбіни та від газової турбіни [2].

Газова турбіна. Додаткова ступінь повертає надлишок тиску вихлопу після турбокомпресора головного двигуна. Так, у турбогенераторній установці порція вихлопних газів спрямовується через газову турбіну, що збільшує сумарну віддачу WHR-системи [2, 3].

ORC (Organic Rankine Cycle). Органічний цикл Ренкіна використовує низькотемпературне тепло (з охолоджувальної води, випуску або парової системи) за допомогою фреоноподібної робочої рідини. Він може працювати при відносно низьких температурах (від $\sim 60^{\circ}\text{C}$) та додавати 5–10 % потужності двигуну. Так, Wärtsilä спільно з Turboden розробили Marine ECC – ORC-блок для морського застосування, який забезпечує до $\sim 8\text{--}12\%$ додаткової потужності [4]. Аналогічно, компанія Orca Energy пропонує модульні ORC-модулі (Efficiency Pack) для моторів MAN, що у прикладі двигуна MAN 18V48/60 дали приріст ККД приблизно на 4 % [4].

Системи охолодження двигуна. Водяне охолодження (циферблатний і високотемпературний контури) також може жити ORC-блоки, що додатково підвищує сумарну утилізацію тепла (навіть регазифікований холод LNG можна використовувати у каскаді ORC [3]).

Ефективність WHR-систем та вплив на ККД установки.

Встановлення WHR-систем дозволяє значно підвищити ефективність суднової енергетики. Парова WHR здатна відновлювати $\sim 10\text{--}12\%$ номінальної потужності головного двигуна у вигляді електрики [2, 3]. Наприклад, на установці з 14-циліндровим RT-flex96C ця схема давала $\sim 12\%$ вихідної потужності генератора [2]. Це призводить до зменшення споживання палива до 10 % і відповідного зниження CO_2 -викидів, що поліпшує показники EEDI/EECI судна [4, 6]. Також система покращує співвідношення між виробленою електроенергією та витратами палива: без WHR ККД двигуна $\sim 50\%$, з урахуванням усього теплового потоку (як на комбінованій установці) можна наблизитись до 90 %.

Крім того, ORC-додатки дають додатковий прибуток у кілька процентів. Наприклад, retrofit ORC-модуль Orca на двигуні MAN 18V48/60 дозволив збільшити загальне ККД на майже 4 % (економія ~ 1220 т палива на рік). За складнішими варіантами WHR (двоцикловий паровий котел високого та низького тиску) в дослідженнях показано до $\sim 12\%$ віддачі, але це належить до проєктних схем. Загалом WHR системи підвищують сумарний ККД енергетичної установки, зменшуючи потребу у допоміжних котлах і скорочуючи витрати палива.

Таблиця 1. Порівняння WHR-рішень від провідних виробників двигунів (приклади типових систем та приріст потужності)

Виробник	Система WHR (компоненти)	Додаткова потужність (% від номіналу)
Wärtsilä	Економайзер + парова турбіна + турбогазова турбіна	до ~12% [5]
WinGD	Економайзер + парова турбіна + турбогазова турбіна	~10% [11]
MAN B&W	Композитний котел (двотисковий) + ORC (модулі Orcan)	~4% (при ORC) [8]

Системи інших виробників

Компанії MAN Energy Solutions і WinGD (колишня Wärtsilä Two-Stroke) також пропонують WHR-технології для низькообертових двигунів. Виробники двотактних двигунів MAN B&W для суден класу Kamsarmax і VLCC використовують композитні котли зі збірними трубними полум'яними пальниками, що поєднують тепловіддачу від вихлопу та додатково охолоджувального повітря. Недавно MAN впровадила систему EEC (Economiser Energy Control) – регулювання байпасу вихлопу для підтримки вироблення пари при низьких навантаженнях двигуна. Крім того, MAN співпрацює з Orcan Energy, пропонуючи ORC-модулі в портфоліо апгрейдів. Як зазначено, ORC-приставка на двигуні MAN 18V48/60 підняла ККД на ~4 %.

WinGD (двотактні двигуни X-DF для великих контейнеровозів) надає рішення аналогічні Wärtsilä. Для двигунів діаметром 82–92 см уже існують парові WHR-установки, які дають до ~10 % додаткової потужності. Так само встановлюється комплект економайзер+турбогенератор: пара з котла йде на турбіну. Як і у Wärtsilä, парова схема рекомендується на судна з великим сумарним споживанням, тоді як ORC можуть застосовуватися як додатковий модуль.

Типові схеми на різних типах суден

На контейнеровозах та великих вантажних судах із високою потужністю головних двигунів WHR-системи практично стандартні. Наприклад, на першому у світі 14-циліндровому Wärtsilä RT-flex96C для контейнеровоза встановлено високоефективну WHR-установку (економайзер + парова та газова турбіни) [2]. Це забезпечує значну економію палива й дозволяє виконувати побічні функції (наприклад, допомога ходовому гвинту через маточину).

На балкерах (Kamsarmax, Panamax) двигуни мають меншу встановлену потужність, але система WHR все одно корисна: пар від економайзера використовують для виробництва питної води, опалення палубних систем і допоміжних насосів. Особливо актуально за суворих енергетичних вимог ІМО (EEDI), коли допустима потужність обмежена.

На газовозах та LNG-танкерах WHR використовується ще ширше. Тут до звичайних джерел тепла додаються низькотемпературні потоки: тепло високотемпературного контуру двигуна, тепло регазифікованого СПГ тощо. Наприклад, пара з економайзера часто спрямовується на турбіни приводів насосів для перекачування зрідженого газу [2]. Низькопотенціальні теплові потоки можна перетворювати на електроенергію за допомогою ORC. У результаті досягаються додаткові вигоди: зменшення роботи дизель-генераторів (закривання ДГ), зниження споживання палива і викидів CO₂.

Ключові проєкти й приклади впровадження

- 2006 р. – надпотужний контейнеровоз. Перший двигун Wärtsilä RT-flex96C на 14 циліндрів (потужність 80 080 кВт) отримав WHR-установку, що дала до 12% додаткової електроенергії.
- 2019 р. – retrofit ORC на MAN-двигуні. На судні встановлено ORC-модуль Orcan Efficiency Pack до двигуна MAN 18V48/60, завдяки чому ККД системи зросло $\approx 4\%$, що дало суттєву економію палива.
- Інші випадки. WHR-системи також застосовуються на хімовозах і танкерах із двигунами Wärtsilä 10V31DF (додаткові ORC-блоки), LNG-танкерах (парова система для насосів), а також на нових RORO- та круїзних судах (складні комбіновані цикли). Усюди WHR-установки значно підвищують енергоефективність суден.

Висновки

Сучасні WHR-системи для малих обертів дизелів Wärtsilä ефективно перетворюють тепло вихлопу та охолодження в корисну енергію. Головними компонентами є економайзер-парогенератор та турбогенератор (парова+газова турбіна), інколи доповнені ORC-блоками. Вони забезпечують $\sim 8\text{--}12\%$ додаткової потужності головного двигуна [2,3], що прямо відбивається на паливній економії та зниженні викидів. У порівнянні з аналогами MAN і WinGD, характеристики WHR-систем близькі: у виробах WinGD також до $\sim 10\%$ віддачі, а у MAN – $\sim 4\%$ за рахунок ORC (вбудовані котли MAN-більш складні і можуть давати більший вихід у теорії). На практиці WHR-схеми вже впроваджені на великих контейнеровозах, балкерах і газовозах, що дозволяє судновласникам покращити енергоефективність і відповідати сучасним нормам.

Література

1. International Maritime Organization. *IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. London: IMO, 2018.
2. Heim, K. "Existing and Future Demands on the Turbocharging of Modern Large Two-stroke Diesel Engines." *Proceedings of the 8th Supercharging Conference*, Dresden, October 2002.
3. MAN B&W Diesel A/S. *Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation*. Copenhagen: MAN Diesel A/S, 2005.
4. European Commission. *Fit for 55 Package: Reducing Emissions from Maritime Transport*. Brussels: EC, 2021.
5. RightShip & StormGeo. *Just-in-Time Arrival: A Guide to Reducing Port Emissions*. London: RightShip Report, 2022.
6. IMO. *Maritime Energy Efficiency Measures: EEXI and CII Guidelines*. London: IMO, 2023.

Modern Waste Heat Recovery (WHR) Systems on Low-Speed Wärtsilä Marine Diesel Engines

Andrieiev A.A., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Andrieieva N.B., Ph.D., Associate Professor, Kherson Educational and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Kudelia P., higher education student, Kherson Educational and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Abstract: The paper analyzes modern Waste Heat Recovery (WHR) systems used on low-speed Wärtsilä marine diesel engines to convert exhaust and cooling heat into sound energy. The structure and efficiency of economizers, steam and gas turbines, and ORC units are examined. It is shown that WHR systems can increase overall plant efficiency up to 90%, reduce fuel consumption by 8–12%, and lower CO₂ emissions, thus improving ship energy performance indicators.

Keywords: Waste heat recovery, WHR, Wärtsilä, steam turbine, ORC, marine energy efficiency.

УДК 621.311.243

**ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СУДНОВИХ СОНЯЧНИХ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

Андреев А. А.,

канд. техн. наук, професор НУК,

завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

andrii.andrieiev@nuos.edu.ua

Вагін Ф. І.,

завідувач лабораторіями кафедри суднового машинобудування та енергетики

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

fedorvagin5@gmail.com

Зайцев К. В.,

здобувач вищої освіти, гр. 4217ст

Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету

кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна,

zajcevkosta61@gmail.com

Анотація. Функціонування морського транспорту, який є основною логістичною ланкою світової торгівлі, майже повністю залежить від викопного палива, що значною мірою сприяє глобальним викидам парникових газів та забрудненню довкілля. Однак ситуація змінюється, і сонячна енергія стає перспективною альтернативою традиційним джерелам палива на морському транспорті. Інтеграція сонячних технологій у морські судна пропонує перспективний шлях до зменшення екологічної шкоди та експлуатаційних витрат галузі, до більш тривалих морських подорожей.

Ключові слова: морський транспорт, сонячна енергетика, фотоелектричні батареї, сонячні панелі.

В останні роки концепція суден на сонячній енергії перейшла від теоретичних конструкторських розробок до реального впровадження. Інновації в сонячних технологіях, включаючи високоефективні фотоелектричні елементи і легкі та міцні сонячні панелі, проклали шлях для їх інтеграції в морські судна. Ці сонячні установки використовують велику кількість сонячного світла, доступного в світовому океані, перетворюючи його на електричну енергію для живлення суден, від освітлення та приладів до рушійних систем.

Переваги впровадження сонячної енергії в морський транспорт виходять за рамки збереження довкілля. Судна на сонячних батареях мають знижене споживання палива, що призводить до значної економії коштів під час тривалих рейсів. Більше того, зменшуючи залежність від викопного палива, ці судна пом'якшують ризики, пов'язані з волатильністю цін на нафту та перебоями в ланцюжках поставок, забезпечуючи більш стабільну та передбачувану структуру експлуатаційних витрат.

Кілька новаторських проєктів вже продемонстрували потенціал сонячної енергії на морському транспорті. Наприклад, MS «Tûranor PlanetSolar» (власник: «PlanetSolar SA», Швейцарія), найбільший у світі катер-тримаран, який отримує енергію для руху виключно від сонячних батарей (рис. 1 і рис. 2), здійснив навколосвітню подорож без жодної краплі палива, продемонструвавши тим самим життєздатність судноплавства на сонячній енергії. На корпусі катера встановлено 800 сонячних панелей із 38 тис. сонячних елементів, що мають ККД близько 22 %. Проєкт коштував близько \$26 млн. Технічні характеристики судна: довжина 31 м; ширина 15 м; висота 6,1 м; площа сонячних елементів 516 м²; максимальна швидкість 14 вузл.; пасажиромісткість 50 осіб [1].

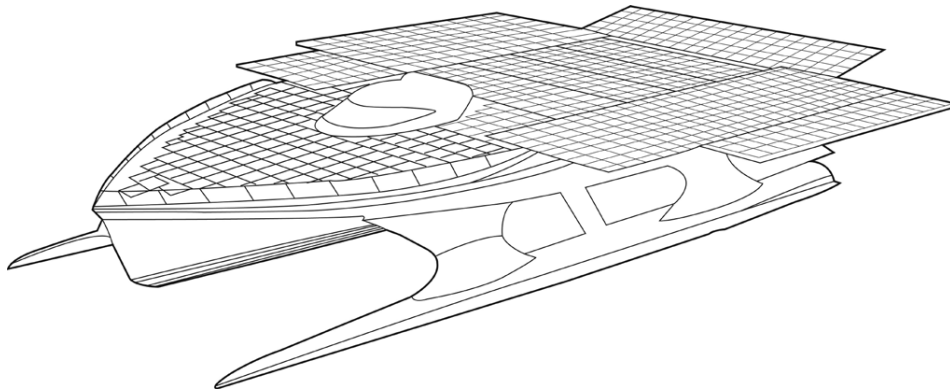


Рисунок 1. Загальний вид MS «Tûranor PlanetSolar»



Рисунок 2. MS «Tûranor PlanetSolar» в Маямі

Тим часом на вантажних суднах і поромках все частіше впроваджують гібридні системи, поєднуючи сонячну енергію зі звичайними двигунами. Було показано, що цей підхід підвищує ефективність та значно зменшує шкідливі викиди, причому деякі судна повідомляють про зниження споживання палива до 20 %.

Так, голландська компанія «Wattlab» – новатор у галузі морської сонячної енергетики – впровадила у 2025 р. сонячну систему потужністю 37,5 кВт для забезпечення живленням бортових і рушійних систем вантажного судна MS «BLUE MARLIN» [2] внутрішнього судноплавства (рис. 3), що курсує по німецькій мережі каналів, компанії «HGK Shipping», найбільшій у Європі компанії внутрішніх водних перевезень.



Рисунок 3. MS «BLUE MARLIN»

Сонячна система з 192 панелями була встановлена на верфі De Gerlien van Tiem й буде використовуватися не лише для живлення бортових систем, а й для безпосереднього живлення високовольтної дизель-електричної енергетичної установки судна. Система працюватиме разом із бортовими акумуляторами та дозволить вимикати один із чотирьох дизель-генераторів навіть у періоди високого навантаження.

У той же час, ця сонячна енергетична установка не є найбільшою – раніше на MS «HELIOS» було встановлено 312 сонячних панелей [3].

Судноплавні компанії також досліджують інноваційні конструкції, такі як комбіновані сонячні вітрила та сонячні рушійні установки, які використовують як вітрову, так і сонячну енергію для оптимальної ефективності. У 2024 р. галузь спостерігала зростання впровадження цих технологій, понад 50 суден по всьому світу використовують сонячну енергію як доповнення до своїх рушійних систем, зменшуючи залежність від викопного палива. Ці розробки сигналізують про зростаючу тенденцію до мультимодальних рішень у сфері відновлюваної енергії в галузі, що вказує на позитивну траєкторію до більш сталого та енергоефективного морського майбутнього.

Слід зазначити, що впровадження сонячної енергії в морському транспорті стикається зі значними перешкодами. Із фінансової точки зору, початкова вартість встановлення сонячних батарей та модернізації існуючих суден сонячними технологіями є значним бар'єром, а витрати сягають мільйонів доларів. Крім того, морське середовище створює унікальні проблеми, такі як корозія в солоній воді, яка може руйнувати сонячні панелі швидше, ніж на суші, та обмеження простору на судах, що може обмежувати кількість та ефективність сонячних панелей, які можна встановити. У 2024 р. середня вартість модернізації вантажного судна середнього розміру сонячними панелями та необхідними системами оцінювалася від \$2 млн до \$5 млн, і ця цифра значно варіюється залежно від складності та масштабу установки, від розміру та типу судна.

Висновок. Незважаючи на вказані вище проблеми, перехід на сонячну енергію в морському транспорті відкриває численні можливості. Досягнення в матеріалознавстві та інженерії призводять до появи більш надійних, ефективних та економічно вигідних сонячних технологій, спеціально розроблених для морського застосування. Були розроблені нові типи сонячних панелей, які є більш стійкими до корозії в солоній воді та краще підходять для морського середовища, демонструючи 20 % збільшення довговічності та ефективності порівняно з традиційними моделями. Крім того, зростаючий акцент на сталому розвитку з боку регулюючих органів та міжнародних організацій сприяє створенню сприятливого середовища для відновлюваної енергії в судноплаванні. Такі стимули, як податкові пільги чи субсидії, а також суворі екологічні норми заохочують судноплавні компанії інвестувати в зелені технології.

Література

1. Hakan Gursu. Solar And Wind Powered Concept Boats: The Example Of Volitan. December 2014. *METU Journal of the Faculty of Architecture*. 31(2):109-123.

DOI: 10.4305/METU.JFA.2014.2.6

2. The “Blue Marlin” vessel with sustainable propulsion and inland waterway logistics
<https://inspenet.com/en/noticias/the-blue-marlin-vessel-with-sustainable-propulsion-and-inland-waterway-logistics/>

3. MS Helios breaks world record with 312 solar panels
<https://inspenet.com/en/noticias/record-of-ms-helios-solar-panels-ship/>

PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF SHIP-BASED SOLAR POWER SYSTEMS

Andreiev Andrii, Ph.D., Professor, Head of the Department of Ship Engineering and Power Engineering, Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Vahin Fedir, Head of Laboratories of the Department of Ship Engineering and Power Engineering, Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Zaitsev Kostiantyn, higher education student, Kherson Educational and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Abstract. The functioning of maritime transport, the main logistical link of world trade, is almost entirely dependent on fossil fuels, significantly contributing to global greenhouse gas emissions and environmental pollution. However, the situation is changing, and solar energy is becoming a promising alternative to traditional fuel sources in maritime transport. Integrating solar technologies into marine vessels offers a promising path to reducing the industry's environmental damage and operating costs, enabling longer sea voyages.

Keywords: maritime transport, solar energy, photovoltaic batteries, solar panels.

УДК 661.53:656.612

USE OF AMMONIA IN MARINE VESSEL RECYCLING POWER PLANTS

Andreiev A.,

PhD, Professor, Head of the Department of Ship Engineering and Power Engineering, Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

andrii.andreiev@nuos.edu.ua

Kaliuzhnyi M.,

Higher education student, Kherson Educational and Research Institute, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

kaluygnuymaksim1986@gmail.com

Abstract. In order to generate electricity from low-potential heat sources with temperatures up to 100 °C, for example, fresh water cooling the main engine, ammonia (NH₃) is an effective working agent in recycling power plants. The results of scientific research, development, and industrial operation confirm the high efficiency of ammonia transport recycling power plants for a wide range of applications in energy: from the World Ocean to space.

Keywords: low-potential heat source, recycling power plant, low-boiling working fluid, ammonia, water-ammonia solution.

The issue of recycling secondary heat resources of ship diesel power plants is extremely acute [1, 2]. A particular problem is using low-potential heat sources with a temperature of up to 100 °C to generate electricity, such as fresh water cooling the main engine (ME). This is because at such a temperature level, traditional recycling power plants (RPPs), which implement the Rankine condensation cycle with water vapor as the working fluid, have several significant drawbacks [3]. The presence of a vacuum in the system leads, firstly, to large specific volumes of water vapor, and, consequently, to bulky stages of low pressure of the turbine and increased diameters of pipelines, and, secondly, to the need for ejector and deaeration units. Significant moisture content of water vapor at the end of the expansion process reduces the efficiency of the power turbine and causes erosion damage to its blades.

These disadvantages can be overcome by using low-boiling working fluids (LBWF) [2, 3]. A particular problem is the choice of a rational LBWF, since there are significant negative aspects to using traditional working fluids of the RPPs. For example, chlorofluorocarbons are characterized by low thermal stability, high fluidity, considerable cost, etc., and hydrocarbons are characterized by flammability.

An effective working agent can be ammonia (NH₃), which is environmentally safe (ozone layer, greenhouse effect), cheap, has good thermodynamic indicators, and heat transfer characteristics. The use of ammonia becomes more expedient if an ammonia refrigeration unit is installed on the vessel. In this case, it is possible to attract another source of low-potential heat resource, namely the heat of overheating of ammonia vapours after compression in the compressor (the temperature of the end of the compression process can reach 160 °C [4, 5]). In addition, ammonia is now being actively considered as a promising fuel for shipboard engines, making it possible to decarbonize shipping and minimize its environmental impact.

However, today in the scientific and technical literature, there is only scattered data on specific developments of ammonia RPPs, schemes of their operation, designs of machines and devices, and thermodynamic, technical, and economic indicators. This determined the purpose of this study: to analyse the schemes and characteristics of various ammonia RPPs to substantiate the areas of their best application in the energy industry, including shipping.

Ammonia as an LBWF of RPPs has a long history. Back in 1881, Jacques-Arsène d'Arsonval, theoretically justifying the possibility of using the world Ocean's vast reserves of thermal energy, proposed using ammonia as a working fluid for ocean thermal power plants (OTPPs). Ammonia remains the primary working fluid in the designed and created ocean thermal power plants for tropical and Arctic regions [6, 7].

Another promising direction for utilizing low-potential secondary heat resources is the RPPs on a water-ammonia solution. The first to propose using this working fluid in the heat engine cycle was

L.M. Rosenfeld in 1955 [3]. Industrial RPPs on this working mixture, implementing the Kalina cycle, have been operated since 1999 in Japan at the Kashima Steel Works plant (utilization of wastewater heat at a temperature of 98 °C), and since 2000 in Iceland (geothermal sources at a temperature of 121 °C); the generated electric power is 3.1 and 2.0 MW, respectively.

Marine RPPs with water-ammonia LBWF have confirmed their operability and efficiency in research and industrial operation, and their consideration in foreign technical literature has recently received much attention. The shipboard direction of RPPs implementation is reflected in research conducted at the National University of Shipbuilding (Mykolaiv). The results of consideration of schemes for utilizing low-potential heat from ship diesel installations show that ammonia is in the group of LBWFs that provide the highest thermodynamic indicators of RPPs. For example, when calculating a plant that utilizes 1,630 kW of heat from the high-temperature circuit of the freshwater cooling system of the main ship's medium-speed diesel engine of the 6L46-B brand manufactured by Wartsila (Finland) with a capacity of 5,850 kW, with the following initial data: the temperatures of the freshwater cooling system at the outlet and inlet to the waste heat recovery boiler are 74 and 91 °C, respectively; the boiling and superheating temperatures of the LBWF vapours in the waste heat recovery boiler are 70 and 80 °C, respectively; the temperatures of the sea water and the condensation of the LBWF are 30 and 35 °C, respectively, the following characteristics of the operation of the ammonia RPP were obtained: the condensation and boiling pressure of ammonia is 1,358 and 3,371 kPa; the mass flow rate of ammonia is 1.37 kg/s; the power consumed by the pump, valid for the cycle and produced by the turbine is 8, 143 and 151 kW, respectively; heat load on the condenser 1,487 kW; thermal efficiency of the installation 9.2 %.

The analysis of the schemes and the thermodynamic, technical, and economic characteristics of ship USUs shows that, due to its undeniable advantages, ammonia is one of these power plants' main promising working fluids. The results of research and development, experimental and design developments, and industrial operation confirm the high efficiency of ammonia RPPs for a wide range of applications in the power sector: from the World Ocean to space.

Література

1. Radchenko, R. Enhancing the Efficiency of Marine Diesel Engine by Deep Waste Heat Recovery based on Its Simulation Along the Route Line / R. Radchenko, V. Kornienko, M. Pyrysunko, M. Bogdanov, A. Andreev // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*. – vol. 1113. – Springer, Cham, 2020. – Pp. 337-350.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_29
2. Shu, G. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships / Gequn Shu, Youcai Liang, Haiqiao Wei, Hua Tian, Jian Zhao, Lina Li // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 19, March. – Pp. 385-1401.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.034>
3. Андреев, А.А. Перспективи застосування морських аміачних утилізаційних силових установок / А.А. Андреев, В.І. Свиридов, Д.О. Шалапко // *Розвиток транспорту*. – 2023. – № 2 (17). – С. 16–28.
<https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.02>

4. Загоруйко, В.О. Суднова холодильна техніка [Текст] : підруч. / В. О. Загоруйко, О. А. Голіков ; ред. В. О. Загоруйко ; Одеський держ. морський ун-т, Одеська держ. морська академія. – К. : Наукова думка, 2002. – 576 с.

5. Hafner, P. D.-I. A., Gabriell, D. C. H., & Widell, D. K. (2019). Refrigeration units in marine vessels : Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs. <https://doi.org/10.6027/TN2019-527>

5. Ascari, M.B. Ocean Thermal Extractable Energy Visualization / M.B. Ascari, Hanson H.P., Rauchenstein L., Van Zwieten J., Desikan B., Heimiller D., Langle N., Scott G.N, Potemra J., Nagurny J.N., Jansen E. // Final Technical Report on Award DE-EE0002664. October 28, 2012. United States: N. p., 2012. [doi:10.2172/1055457](https://doi.org/10.2172/1055457).

6. Андреев, А.А. Перспективи застосування аміаку в морських утилізаційних силових установках / А.А. Андреев, М.А. Пирисунько, О.І. Година // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 22.03.2023 – 23.03.2023.— Одеса: Національний університет "Одеська морська академія", 2023. – С. 108-110. <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/Tezysy2023-2.pdf>

7. Colorado-Garrido, D. An Ocean Thermal Energy Conversion power plant: Advanced exergy analysis and experimental validation /Dario Colorado-Garrido, Emmanuel Mendoza-Bernal, Lili M. Toledo-Paz, Beatris A. Escobedo-Trujillo // Renewable Energy. – Vol. 223, March 2024, 120018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120018>

Використання аміаку в утилізаційних силових установках морських суден

Андреев Андрій Адольфович, кандидат технічних наук, професор НУК? завідувач кафедри суднового машинобудування та енергетики Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Калюжний Максим Григорович, здобувач вищої освіти, група 2227, Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Анотація. З метою генерації електроенергії від джерел низькопотенційної теплоти, що мають температуру до 100 °С, наприклад, прісної води, що охолоджує головний двигун, в утилізаційних силових установках ефективним робочим агентом є аміак (NH₃). Результати науково-дослідних робіт, дослідно-конструкторських розробок та промислової експлуатації підтверджують високу ефективність аміачних транспортних утилізаційних силових установках для широкого спектру застосування в енергетиці: від Світового океану до космосу.

Ключові слова. джерело низькопотенційної теплоти, утилізаційна силова установка, низькокипляче робоче тіло, аміак, водоаміачний розчин.

УДК 621.352:629.541

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН

В. В. Слюсаренко, аспірант,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Україна, м. Миколаїв

Volodymyr.Slyusarenko@zalivdesign.com

Анотація. Виконано аналіз можливостей застосування низькотемпературних паливних елементів у системах енергозабезпечення пасажирських суден. Оцінено ефективність роботи, основні технічні проблеми та шляхи підвищення надійності. Наведено приклади реалізованих проєктів і визначено перспективи інтеграції технології в сучасне суднобудування.

Ключові слова: низькотемпературні паливні елементи, водневе паливо, пасажирське судно, екологічні стандарти, декарбонізація.

Вступна частина. Сучасний морський транспорт дедалі інтенсивніше переходить на альтернативні джерела енергії задля досягнення цілей декарбонізації відповідно до стратегії ІМО та ЄС [1, 2]. Низькотемпературні водневі паливні елементи (ПЕ) – зокрема протон-обмінні (PEMFC) та лужні (AFC) – пропонують “нульові” локальні викиди (єдиним продуктом реакції є вода) та тишу під час роботи. Сьогодні вже реалізовано перші пілотні проєкти пасажирських суден із силовими установками на ПЕ, а розробка таких систем ведеться у різних країнах світу. Водночас широкому впровадженню технології заважають певні моменти технічної недосконалості, вартість та відсутність розгалуженої інфраструктури заправки порівняно з традиційними видами палива.

Ціль роботи – аналіз світового досвіду (реалізовані й пілотні проєкти), технічні виклики, екологічні переваги, економічні аспекти та перспективи низькотемпературних ПЕ на пасажирських судах.

Основна частина.

Світовий досвід впровадження

У 2009 р. у Нідерландах через амстердамські канали був запущений річний трамвай “Nemo H2” (рис. 1). Він став першим у світі комерційним судном з енергетичною установкою на ПЕ. Працюючи на водню він є екологічним і тихим (викиди – тільки водяна пара), але собівартість будівництва була вдвічі вищою, ніж у аналогічного дизельного катеру та потрібна щоденна заправка воднем (на відміну від дизеля – раз на тиждень) [3, 4].

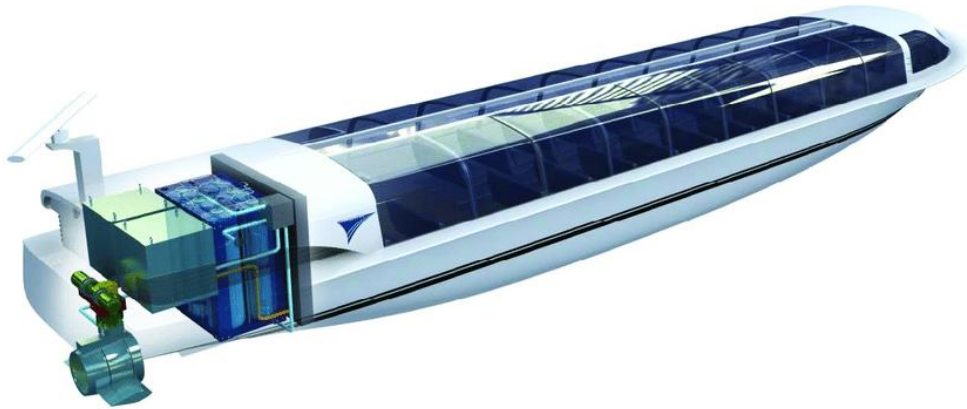


Рисунок 1 – Річний трамвай “Nemo H2” [4].

У 2023 році на маршруті у норвезьких фіордах почав працювати пором MF Hydra (Norled AS) – перший у світі комерційний пором на рідкому водні. На ньому встановлено два 200-кВт PEMFC Ballard FCwave™. MF Hydra перевозить 295 пасажирів і 80 автомобілів [5]. У липні 2024 у Сан-Франциско розгорнуто MV Sea Change - 21-метровий катамаран на 75 пасажирів з ПЕМ-паливними елементами (360 кВт) від Ballard та батареями (600 кВт загалом). Підтримка державною владою (безплатне перевезення протягом 6 місяців) дозволяє протестувати технологію. Компанія Switch Maritime планує до 2028 р. створити пором на 150 пасажирів для Нью-Йорка (отримала грант \$2M) [6].

Окрім уже експлуатованих, існують амбітні дослідні проєкти. У Норвегії ABB та Ballard Power Systems розробили 3 МВт концепт водневого двигуна для круїзного судна – у 2022 році DNV видало принципове схвалення (AiP) для цього рішення [7]. У США GE Power Conversion разом з нідерландською Nedstack Fuel Cell Technology розробили 2-МВт паливну установку для експедиційного круїзного корабля. [8] Hydrogenious LOHC Maritime (Норвегія) пропонує альтернативу - паливо на основі рідкого органічного носія водню (ЛОHC), який безпечно зберігає H_2 при атмосферному тиску. Пілотний проєкт HyNjord (Норвегія) отримав принципове схвалення DNV на установку ЛОHC-релізеру для живлення ПЕ потужністю 130 кВт а у проєкті Ship-aH2oу ЛОHC+ПЕ використовуватимуться на судні технічного забезпечення вітрогенераторів. [9]

У табл. 1 наведено деякі приклади пасажирських суден з низькотемпературними ПЕ.

Таблиця 1 – Приклади пасажирських суден з низькотемпературними ПЕ

Судно/Проект	Тип судна	Країна	Кількість пасажирів	Тип ПЕ	Потужність (кВт)
NemoH ₂ (2009)	Річний трамвай	Нідерланди	87	PEMFC (H ₂)	60
Hornblower Hybrid (2011)	Пором-катамаран	США	149	PEMFC (H ₂) + дизель	80
MF Hydra (2023)	Ліхтер-пором	Норвегія	295	PEMFC (LH ₂)	400
MV Sea Change (2024)	Катамаран	США	75	PEMFC (CH ₂ /H ₂)	360
Mahoroba (2025)	Катамаран	Японія	150	Н/Д (H ₂)	452

Технічні виклики. Паливна інфраструктура. На відміну від дизеля, заправки воднем у морському флоті майже відсутні. Потрібно або будувати портові станції, або доправляти зріджений/суміщений водень. **Безпека.** Водень – легкозаймиста субстанція, тому суднам з ПЕ приділяється підвищена увага з боку пожежної безпеки. У 2025 році ІМО прийнято проміжні настанови щодо використання стисненого та зрідженого водню [10]. **Надійність.** PEMFC і AFC мають обмежену довговічність. Відомо, що PEMFC деградують через руйнування каталізатора, ослаблення мембрани та корозію карбону під динамічними навантаженнями і коливаннями температури/вологості [11].

Екологічні переваги. Паливні елементи забезпечують практично нульові локальні викиди: при генерації енергії вони виділяють лише воду. Навіть у разі виробництва водню не з відновлюваних джерел (так званий «сірий» водень) експлуатаційні викиди порівняно з дизелем анітрохи не зростають. Для міжнародної морської галузі це означає можливість досягти амбіційних цілей ІМО: на МЕРС 83 встановлено вектор зниження до нетто-нульового балансу CO₂ до 2050 р [12]. У ЄС діють жорсткі нормативи: нова директива FuelEU Maritime вводить поступове зменшення середнього вуглецевого індексу палива для суден з 2025 по 2050 рр., а пасажирські судна мають використовувати берегове електроживлення в порту або альтернативу з нульовими викидами. Водневі ПЕ повністю відповідають цим вимогам.

Крім CO₂, електричні судна з ПЕ суттєво зменшують локальні забруднення повітря. На відміну від дизеля, у них відсутні вихлопні NO_x, SO_x і тверді частинки, що особливо важливо для прибережних зон і портів. Електричні двигуни і ПЕ також працюють практично безшумно –

суттєве зниження шуму підвищує комфорт пасажирів і дозволяє суднам заходити у природоохоронні зони.

Економічні переваги. Поки що водневі суднові ПЕ-системи мають високу вартість: і капітальні витрати на обладнання, і поточні на паливо. Наприклад, річковий трамвай *Nemo H₂* коштував понад €3 млн – удвічі дорожче за порівнянний дизельний човен [3]. Такі преміальні витрати частково покривалися державним грантом. Аналогічно, побудова першого норвезького водневого порома *MF Hydra* обійшлася у значну суму і здійснювалася з державною підтримкою (норвезька влада та класифікаційні органи активно сприяли стандартизації) [5]. Операційні витрати поки що теж більші: *Nemo H₂* потребував щоденного заправлення воднем (через обмежену ємність цистерн), тоді як дизельному аналогу вистачало заправитися раз на тиждень [3]. Вартість водню (зокрема зеленого, з відновлюваних джерел) традиційно вища за вартість морського дизеля.

З іншого боку, помітні тенденції на зниження цін ПЕ. Масштабне виробництво автомобільних ПЕ в останні роки вивело вартість паливного елемента в діапазон менше сотні доларів за кіловат і надалі очікується падіння вартості завдяки серійному випуску (рис. 2).

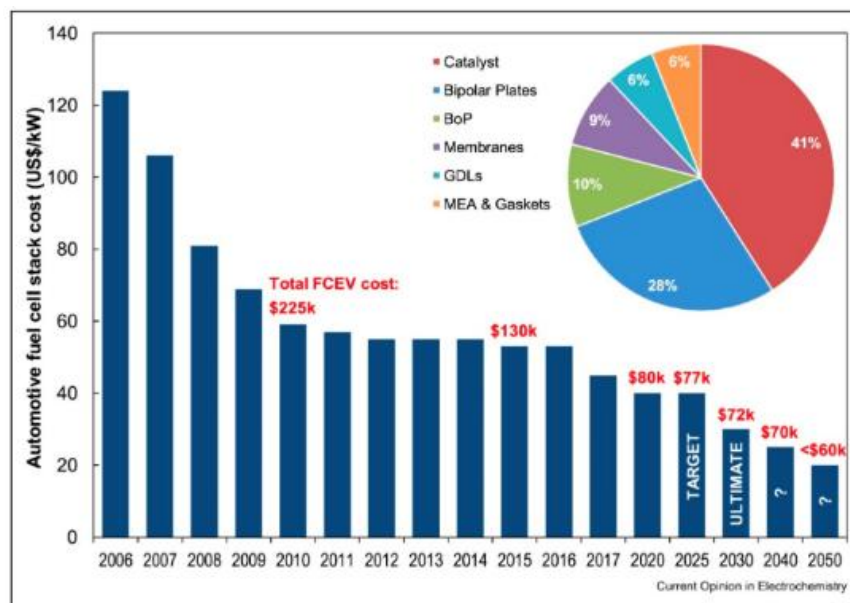


Рисунок 2 – Динаміка зміни вартості автомобільних паливних елементів та прогнозів. Вартість стека паливних елементів PEMFC показана стовпчиками, а вартість усього паливного елементного автомобіля (FCEV) наведена для окремих років [13]

Також поступове зниження ціни зеленого водню прогнозується зі збільшенням встановлених потужностей електролізерів (цілі \$2–3/кг до 2030 р.). У США, наприклад, під держпрограми вже виділено мільярди доларів на “чистий водень” і судноплавство (танкерів на водні), що з часом сприятиме зниженню тарифів.

Перспективи розвитку

Технологія низькотемпературних ПЕ у морі перебуває на етапі активної розробки, але вже демонструє високу масштабованість і гнучкість інтеграції. Розпочинаються проєкти з десятками мегават. Так, ABB і Ballard показали, що PEMFC можна масштабувати до 3–4 МВт для великих суден (круїзних та морських). Одна зі стратегій – поєднувати ПЕ з іншими джерелами: наприклад, гібриди з батареями забезпечують піки потужності та регенерацію енергії під час гальмування, а ПЕ працюють як ефективний генератор на сталому навантаженні.

З часом очікується, що вартість систем продовжить падати завдяки росту виробництва та новим розробкам (наприклад, використання кращих каталізаторів, нових полімерних мембран тощо).

Розширення водневої інфраструктури (будівництво морських терміналів, флотилій водневих танкерів, кластери «H₂-бункерних» проєктів у портах) значно пришвидшить впровадження. Уже зараз деякі великі порти (Роттердам, Гамбург, Сінгапур) створюють «водневі хаби» з установками електролізу.

Таким чином, в найближчому майбутньому силові гібридні комплекси суден можуть поєднувати акумулятори, ПЕ, дизельні двигуни і т.п. Низькотемпературні ПЕ, маючи гнучку потужність та екологічність, можуть знайти застосування як основна чи додаткова силова установка на пасажирських і річкових судах, а також яхтах.

Висновки. Низькотемпературні паливні елементи (PEMFC, AFC) на пасажирських судах показують обнадійливі результати в перших пілотах: вони забезпечують чисте і тихе судноплавство без локальних викидів CO₂/NO_x/SO_x. Разом із тим технічні бар'єри ще суттєві: необхідні воднева інфраструктура у портах, вдосконалення матеріалів паливних елементів для збільшення ресурсу, а також оптимізація електросистем судна. Економічні витрати на ПЕ сьогодні вищі за традиційні, однак розширення виробництва та підтримка державних програм дають підстави сподіватися на різкий спад цін в найближчі роки. Зростання законодавчого тиску і користь від збереження довкілля роблять впровадження водневих систем вигідним з погляду суспільства. У підсумку, низькотемпературні паливні елементи мають значний потенціал для майбутнього пасажирських суден – особливо у поєднанні з гібридними енергосистемами та акумуляторами. Їхнє широке розповсюдження слідує підтримці від урядів, інвестиціям у водневу інфраструктуру та накопиченому досвіду реалізованих проєктів.

Список літератури

[1] RESOLUTION MEPC.377(80) (adopted on 7 July 2023) 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS.

[2] REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC

[3] Reuters. First fuel cell boat cruises Amsterdam's canals. 9 Dec 2009
URL: <https://www.reuters.com/article/business/energy/first-fuel-cell-boat-cruises-amsterdam-s-canals-idUSGEE5B81QK/> (дата звернення 20.10.2025)

- [4] Moritz Krijgsman. Nemo H2 , a unique Dutch Innovation. Журнал Revista Ingeniería Naval
URL: <https://sectormarítimo.es/wp-content/uploads/2018/01/nemoh2-thealewijnsefuelcellboatstory-120514044701-phpapp02.pdf> (дата звернення 20.10.2025)
- [5] Betina Holtze. World's first liquid-powered hydrogen ship, MF Hydra, is powered by Ballard's fuel cells. Корпоративний блог компанії Ballard Power Systems.
URL: <https://blog.ballard.com/marine/worlds-first-liquid-powered-hydrogen-ship-mf-hydra-is-powered-by-ballards-fuel-cells> (дата звернення 21.10.2025)
- [6] Maria Gallucci. San Francisco launched a hydrogen ferry. Now NYC may get one too. Журнал Canary Media.
URL: <https://www.canarymedia.com/articles/hydrogen/ny-ferry-switch-maritime-sea-change> (дата звернення 21.10.2025)
- [7] ABB and Ballard reach milestone toward fuel cell-powered marine transport. Пресс-реліз.
URL: <https://new.abb.com/news/detail/88060/abb-and-ballard-reach-milestone-toward-fuel-cell-powered-marine-transport> (дата звернення 21.10.2025)
- [8] Nedstack Fuel Cell Technology renews its Partnership Agreement with GE Power Conversion for the development of marine fuel cell solutions.
URL: <https://nedstack.com/en/news/nedstack-fuel-cell-technology-renews-its-partnership-agreement-ge-power-conversion-development> (дата звернення 21.10.2025)
- [9] Hydrogenious LOHC Maritime. Сайт виробника обладнання.
URL: <https://hydrogenious-maritime.com/>
- [10] IMO CCC 11: Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Hydrogen as Fuel.
- [11] Foniok, K.; Drozdova, L.; Prokop, L.; Krupa, F.; Kedron, P.; Blazek, V. Mechanisms and Modelling of Effects on the Degradation Processes of a Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell: A Comprehensive Review. *Energies* 2025, 18, 2117. <https://doi.org/10.3390/en18082117>
- [12] Draft revised MARPOL Annex VI, Circular Letter No.5005; 11 April 2025
- [13] Agyekum, E.B.; Ampah, J.D.; Wilberforce, T.; Afrane, S.; Nutakor, C. Research Progress, Trends, and Current State of Development on PEMFC-New Insights from a Bibliometric Analysis and Characteristics of Two Decades of Research Output. *Membranes* 2022,12, 1103.
<https://doi.org/10.3390/membranes12111103>
- Slyusarenko V.

Low-temperature fuel cells in passenger ship energy systems: current state and prospects

An analysis of the potential application of low-temperature fuel cells in the power systems of passenger vessels has been carried out. The operational efficiency, main technical challenges, and ways to improve reliability have been evaluated. Examples of implemented projects are provided, and the prospects for integrating this technology into modern shipbuilding are identified.

Keywords: low-temperature fuel cells, hydrogen fuel, passenger vessel, environmental standards, decarbonization.

UDC 620.92

INTEGRATION OF KNOWLEDGE ON ALTERNATIVE ENERGY SOURCES INTO MARITIME ENGINEERING EDUCATION

A. Simanenkov, Cand. Sc., assoc. prof.¹, O. Akimov, Cand. Sc., assoc. prof.²,

A. Dzygar, Marine CE, senior lecturer³

Kherson State Maritime Academy

Ukraine, Odesa

¹Simanenkov.andrii@gmail.com, ²akimoffsasha@gmail.com, ³anatolii.dzygar@gmail.com

Abstract. The maritime industry is undergoing a rapid transition toward alternative energy sources, driven by international decarbonization goals and the IMO 2023 GHG strategy. Training institutions must adapt curricula and pedagogical methods to prepare seafarers for the operation of next-generation propulsion systems based on methanol, ammonia, hydrogen, battery technologies and nuclear power. This paper presents an educational framework developed at Kherson State Maritime Academy (KSMA), Ukraine, in collaboration with international partners, focusing on the integration of knowledge about alternative fuels into the educational process of marine engineering cadets.

Keywords: maritime education, alternative fuels, IMO guidelines, marine engineering, STCW training.

Introduction. Decarbonization has become one of the key challenges for global shipping. The International Maritime Organization (IMO) has recognized the urgent need for specific training guidelines for seafarers operating vessels powered by low-flashpoint and renewable fuels (IMO, 2025). Maritime academies play a crucial role in solving the gap between emerging technologies and workforce competence. KSMA has initiated a comprehensive curriculum reform, integrating scientific, regulatory, and operational aspects of alternative fuels into both theoretical and simulator-based training.

Aim of the Study. The aim of this study is to develop and substantiate an educational framework for integrating knowledge about alternative marine fuels such as methanol, ammonia, hydrogen, biofuels, liquefied natural gas (LNG) and nuclear power into the training of marine engineers.

The framework seeks to align maritime higher education programs with current IMO decarbonization policies and the International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code), ensuring that cadets acquire the theoretical, operational and safety competencies necessary for the transition to sustainable maritime energy systems.

Main part. Alternative Marine Fuels and Their Educational Implications. The transition to alternative marine fuels is central to achieving decarbonization in global shipping [4]. The current landscape includes several promising fuel types, each with distinct advantages, limitations, and training requirements [5]:

1. Liquefied Natural Gas (LNG). LNG remains the leading transitional fuel, offering 20–25 % CO₂ emission reduction compared to conventional heavy fuel oil. However, challenges such as methane

slip and cryogenic handling require specialized training for safe bunkering and operation of dual-fuel engines.

2. Methanol. Recognized for its liquid state at ambient conditions and compatibility with current storage systems, methanol reduces SO_x and NO_x emissions significantly. Educational modules emphasize low-flashpoint management, combustion control and emission mitigation strategies.

3. Ammonia. A zero-carbon fuel with significant potential but requiring careful handling due to toxicity and corrosiveness. Cadets must be trained in emergency procedures, personal protective equipment (PPE) usage and system integrity management;

4. Hydrogen. Hydrogen fuel provides complete carbon-free operation, though with complex storage and safety issues. Educational focus includes high-pressure containment, cryogenic storage principles and fuel-cell integration for auxiliary systems.

5. Biofuels. Derived from renewable sources such as biomass or waste oils, biofuels provide flexibility in existing diesel engines. Training covers lifecycle assessment, blending ratios and the verification of fuel quality parameters.



Figure 1 – Alternative marine fuels review

Another significant direction in the search for sustainable and high-efficiency maritime power systems is the application of nuclear energy for ship propulsion. Nuclear marine propulsion, primarily based on pressurized-water reactors (PWR) has been successfully utilized in naval fleets and several civilian vessels.

Modern developments in small modular reactors (SMRs) and molten salt reactors (MSRs) offer renewed prospects for civilian use due to enhanced safety, compact size, and potential for long operational cycles without refueling. From an educational perspective the inclusion of nuclear energy topics in marine engineering curricula is essential for preparing specialists capable of understanding

radiation protection, reactor control, emergency shutdown procedures and international regulatory frameworks such as the IMO's safety standards for nuclear-powered ships.

Although large-scale deployment remains limited due to high capital costs and strict licensing requirements, nuclear propulsion represents a strategic technology for achieving near-zero greenhouse gas emissions in maritime transport and warrants specialized academic attention within advanced marine engineering programs.

Integrating these fuels into maritime curricula requires updating course syllabuses to reflect IMO's International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code), and recent guidance documents such as MSC.1/Circ.1621 [2, 3]. Simulator-based exercises should replicate emergency conditions for methanol, ammonia, hydrogen operations and nuclear power while emphasizing sustainability analysis and emissions monitoring.

IMO Framework and Regulatory Context. At the 11th session of the IMO Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping (HTW 11, 2025), member states approved the development of provisional training guidelines for seafarers serving on ships using alternative fuels [1]. These include:

- general safety requirements for handling methanol, ammonia and hydrogen;
- competence-based standards aligned with STCW.7/Circ.23 and MSC.1/Circ.1621;
- the inclusion of new modules for basic and advanced safety training related to low-flashpoint fuels.

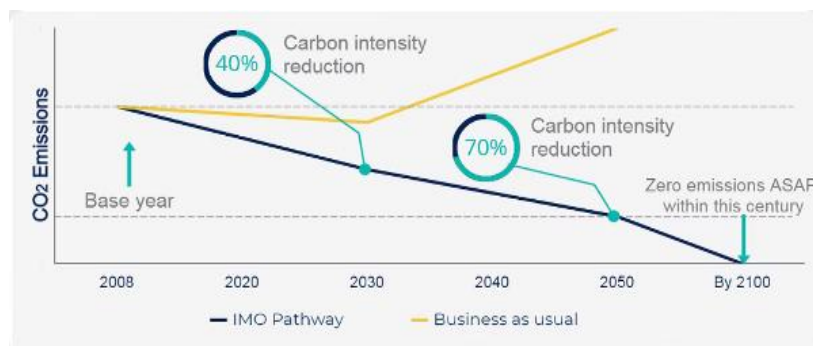


Figure 2 – IMO emission goals

The KSMA initiative aligns with these recommendations by developing modular course content and interactive training packages for different fuel technologies.

Educational Integration at KSMA. KSMA's Ship Energetics Department has started the procedure launching of pilot project entitled "Alternative Fuels in Marine Power Engineering." The program introduces:

- theoretical modules on energy conversion and emission reduction technologies;
- laboratory and simulator-based exercises using virtual and augmented reality (VR/AR) tools;
- digital twins of marine engine systems powered by methanol and ammonia for experiential learning;

– bilingual (Ukrainian–English) course materials to facilitate international cooperation, including partnerships with Plymouth University.

This approach not only enhances technical literacy but also fosters safety culture and environmental responsibility among cadets.

Research and Implementation Outcomes. The first evaluation phase demonstrated increased student motivation and understanding of sustainability issues in maritime operations. Feedback from instructors and cadets highlighted the effectiveness of VR-assisted scenarios for procedural learning and safety awareness. The next phase involves developing joint research and exchange modules with European maritime universities under Erasmus+ initiatives.

Conclusion. Integrating alternative energy knowledge into maritime curricula represents a strategic step toward sustainable shipping and aligns with global maritime decarbonization targets. KSMA's initiative exemplifies a proactive educational response to the evolving regulatory landscape, ensuring that future seafarers possess the technical and environmental competencies required for safe and efficient operation of vessels using methanol, ammonia, hydrogen and other alternative fuels.

References

1. International Maritime Organization (IMO). (2020). Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel (MSC.1/Circ.1621). London: IMO. <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1621.pdf>
2. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2016). Study on the Use of Ethyl and Methyl Alcohol as Alternative Fuels in Shipping. Lisbon: EMSA. <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/2726-study-on-the-use-of-ethyl-and-methyl-alcohol-as-alternative-fuels-in-shipping.html>
3. DNV Maritime. (2023). Maritime Forecast to 2050 – Energy Transition Outlook (Maritime). Oslo: DNV. <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-edition-2023/>
4. Coraddu, A., Oneto, L., & Figari, M. (2021). Data-driven approaches for the modelling and control of marine systems: Methods, applications, and future directions. *Ocean Engineering*, 236, 109558. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109558>
5. Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>

Integration of knowledge on alternative energy sources into maritime engineering education

Simanenkova A., Akimov O., Dzygar A., Kherson state maritime academy

The study is to develop and substantiate an educational framework for integrating knowledge about alternative marine fuels such as methanol, ammonia, hydrogen, biofuels, and liquefied natural gas (LNG) into the training of marine engineers. The maritime industry is undergoing a rapid transition toward alternative energy sources, driven by international decarbonization goals and the IMO 2023 GHG strategy. Training institutions must adapt curricula and pedagogical methods to prepare seafarers for the operation of next generation propulsion systems based on methanol, ammonia, hydrogen, and battery technologies. This paper presents an educational framework developed at Kherson State Maritime Academy (KSMA), Ukraine, in collaboration with international partners, focusing on the integration of knowledge about alternative fuels into the educational process of marine engineering cadets.

Keywords: maritime education, alternative fuels, IMO guidelines, marine engineering, STCW training.

ЗМІСТ ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

Korobko V.V. Modern Trends in Marine Power Engineering and Ship Energy Efficiency Improvement	3
Варбанець Р.А., Мінчев Д.С., Кучеренко Ю.М., Кирилаш О.І. Метод паралельного моніторингу робочого процесу в циліндрі суднового дизеля (тиск у циліндрі + віброакустика)	5
Dolganov I., Przybysz K., Duisebayeva A. Optimization of Wire-Mesh Sensors for Multiphase Flow Measurement with Extended Capabilities.....	7
Чередніченко О.К., Жмурченко Л.О. Підвищення енергоефективності термохімічних модулів обробки палива за рахунок утилізації теплових викидів у енергетичних комплексах	12
Савушкін В.В. Гібридна нейронна мережа – сучасний інструмент аналізу та передбачення теплового стану робочих лопаток турбіни.....	17
Гогоренко О.А., Немченко А.В. Вдосконалення системи збору даних у дослідженнях охолоджувачів наддувного повітря суднових ДВЗ.....	22
Кузнецов В.В., Кузнецова С.А. Інноваційні теплообмінні поверхні суднових утилізаційних котлів	30

СЕКЦІЯ №1. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Галай А.І. Суднобудування в Китаї: перспективи розвитку	34
Самохвалов В.С., Кобалава Г.О., Воїнов О.П. Про вплив форми еластичного рушія та напрямку його осциляційного руху на величину тяги, створюваної ним.....	44
Nalyvaiko V., Oliinyk O., Avdiunin R. ANSI standards for shipboard power plant design and operation.....	47
Димо Б.В., Колбасенко О.В., Анастасенко С.М. Підвищення ефективності та надійності роботи елементів СЕУ при спалюванні водопаливних емульсій.....	52
Грич А.В. Вплив двоступеневого охолодження повітря на зменшення викиду шкідливих речовин газовими двигунами автономної теплоелектростанції.....	57
Волошин А.Ю., Борисов А.В. Підвищення ефективності функціонування кораблів протимінної оборони раціоналізацією управління технічними засобами.....	60
Шумило О.М., Кононова О.М., Россомаха О.А. Забезпечення енергоефективності пасажирських суден при створенні математичної моделі розмірної модернізації.....	63
Троцюк С.В., Фільтанович М.С., Борисенко В.О., Федюк Д.А., Шаля Д.О. Аналіз можливих шляхів підвищення екологічних та економічних показників суднових двигунів за рахунок модернізації паливної системи	72
Митрофанов О.С., Снісар О.Е., Завгородній Д.Е., Білогруд М.М., Білячат О.М. Дослідження ефективності застосування термохімічної утилізації тепла відпрацьованих газів для автомобільного двигуна.....	75

Митрофанов О.С., Федик І.І., Івасюк С.В., Маєррамов Р.А., Петков Ю.П.	
Дослідження впливу параметрів налаштування паливної апаратури на ефективні показники суднового малообертового двигуна.....	78
Лисих А.Ю., Доценко С.М., Климчук В.П., Цибулько Є.С., Філінішин Б.В.	
Підвищення екологічності суднових енергетичних установок за рахунок використання альтернативного палива.....	81
Гричук І.В., Погорлецький Д.С., Дзигар А.К., Задорожній В.К., Довбня П.Ю., Гаврилюк В.В.	
Особливості оцінювання стану суднових теплообмінних апаратів на основі технології цифрових двійників	84
Самарін О.Є., Кальченко В.В., Нікітін В.Д., Ковальчук О.В., Ляшук А.В., Прокопчук О.І.	
Удосконалення конструкції крейцкопфного механізму суднового малообертового дизеля.....	89
Самарін О.Є., Худяков І.В., Пшеничний М.С., Стукал В.О., Філоненко Б.В., Фролов І.С.	
Удосконалення конструкції паливної системи дизеля.....	93
Діасамідзе Б.Т., Кавіч М.І., Борисов А.В.	
Вплив сучасного морського піратства на безпеку судноплавства та ефективність суднових енергетичних установок: аналіз міжнародних конвенцій	98
Зубарев А.А., Войтенко Є.О.	
Аналіз способів покращення екологічних показників суднових двигунів	105
Рязанцев П.А.	
Оглядовий аналіз використання та можливостей низькотемпературних паливних елементів у транспортному флоті	108
Наливайко В.С., Авдюнін Р.Ю., Бойцов О.О.	
Визначення потужності головних двигунів LNG танкерів	111
Сарабун А.А., Петрик Р.В., Купінець Л.К., Шеремет О.А.	
Аналіз шляхів підвищення ефективності енергетичних установок контейнеровозів та балкерів.....	118
Слинько О.Г., Бойчук А.С., Козловський С.В.	
Комбінований термодинамічний цикл дизель-газотурбінної установки з енергоохолодильною установкою	124
Свиридов В.І., Моїсєєнко Ю.І.	
Причини виявлення вібрації підшипників ковзання... ..	131
Савченко В.С.	
Використання WAPS в пропульсивному комплексі судна	134
Halai A.I.	
Ship-hull drag reduction via the Damen air cavity system.....	140
Бондаренко М.С., Чередніченко О.К.	
Аналіз характеристик паротурбінної установки газозова корейської побудови.....	144
Кісстов Ю.В., Личко Б.М.	
Особливості сучасних систем планового технічного обслуговування СЕУ	152
Akimov O., Nahrybelnyi Y.	
Modern approaches to the technical management of shipping companies' fleets.....	160

СЕКЦІЯ №2. УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕМЕНТАХ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Козловський А.В., Діасамідзе Б.Т.	
Експериментальні дослідження слабкострумового плазмового інтенсифікатора в системі двопаливної камери згоряння ГТД.....	164

Єкушенко О.А., Завадський М.С., Крикуненко Д.С., Ліщенко С.С., Білоусов Є.В.	
Представлення числових профілів робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння у PV-координатах.....	168
Weixing Liu, Wanting Hu, Kuznetsov V. Improving workflows in ship propulsion system elements: challenges and prospects.....	172
Грабовенко О.І., Петренко С.В. Особливості застосування рослинних олій в якості палива для дизельних двигунів малої потужності.....	175
Погорлецький Д.С., Худяков І.В., Олійников С.В., Грицук І.В. Покращення очистки палив для двигунів суднових енергетичних установок.....	180
Швець І.А. Перспективні технологічні шляхи переробки соєвої олії у паливо для дизельних двигунів	187
Познанський А.С., Цимбал А.А., Чібісов В.С., Шевчук Д.В., Яковенко О.П. Методи контролю та оцінки стану двигунів внутрішнього згоряння у суднових енергетичних установках.....	191
Познанський А.С., Бондар М.Д., Капура І.А., Кириченко О.С., Медведєв О.М.	
Вдосконалення системи запалювання суднового газового двигуна шляхом застосування форкамерно-факельного принципу	194
Ткач М.Р., Золотий Ю.Г., Галинкін Ю.М., Монахов А.А., Стрельченко Е.С. Міцність поршню в умовах динамічного навантаження	197
Беков Б.А., Шевцов А.П. Обґрунтування дільниць випарного охолодження повітря напрямними лопатками в осьових компресорах газотурбінного двигуна.....	202
Свиридов В.І., Верзун Р.Р. Фізико-технічний аналіз процесів функціонування суднового насосного устаткування	204
Свиридов В.І. Вплив дефектів зношування поверхонь кочення на надійність роботи насосного обладнання.....	207
Дудар О.Ю. Модернізації пропульсивної установки балкера	209
Smetankina N., Morhun S. Experimental methodology for the gas turbine engine rotors fatigue strength study	212
Morhun S., Bushynskii D., Lukyanenko V. Gas turbine engine rotors forced vibration and fatigue study under the non-stationary three dimension gas flow influence	214
Morhun S., Semenov M. Gas turbine engine flame tubes free vibration study	216
Kuznetsov V.V., Cherednichenko O.K., Kuznetsova S.A. Improvement of the weight and size indexes of offshore gas production platforms power plants by using gas turbine plants with thermochemical waste heat recovery	218

СЕКЦІЯ №3-4. ЕНЕРГООЩАДНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СУДНОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ. ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ВИЩІХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

Погорлецький Д.С., Дзигар А.К. Метанол в якості палива для двигунів суднових енергетичних установок	221
Патлайчук В.М., Козирко О.А. Використання бокс-кулерів в централізованих системах охолодження суднових енергетичних установок	227

Патлайчук В.М., Козирко О.А. Estimation of the thermal load on the ship's cooling system from gas turbine engines and their systems	231
Сербін С.І., Патлайчук О.В. Порівняльний аналіз ефективності допалювання випускних газів для суднової системи SOFC-GT	235
Наливайко В.С., Авдюнін Р.Ю. Exploring Everllence for next-generation internal combustion engine design	240
Авдюнін Р.Ю., Заграй Є.В. The application of pulsed magnetic fields in crankshaft repair technology	244
Дрозд О.В., Соломенцев О.І., Кухаренко О.О. Вплив водню як добавки до HVO на утворення оксидів азоту у дизельному згорянні	248
Колесников О.В., Соломенцев О.І., Шалапко Г.Г. Застосування інтелектуального керування для стабілізації режимів роботи двигуна на HVO–H ₂	253
Шалапко Д.О., Вагін Ф.І., Савченко В.С. Побудова цифрового двійника процесу згоряння у судновому двигуні на альтернативному паливі	256
Дрозд О.В., Колесников О.В., Кухаренко О.О. Особливості застосування гідрогенізованої рослинної олії (HVO) та водню у суднових дизельних двигунах	259
Соломенцев О.І., Кухаренко О.О., Хлань М.Д. Аналіз термодинамічних параметрів згоряння суміші HVO–H ₂ у судновому дизелі	264
Шалапко Д.О., Шатайлов А.О. Мікродомішки H ₂ у дизельному паливі: експериментальна візуалізація та вплив на кінетику розпилення при 200 МПа	268
Шалапко Д.О., Афанасієвський О.С. Сучасний стан і перспективи застосування малих домішок водню у суднових дизельних двигунах	273
Шалапко Д.О., Шалапко Г.Г., Стеценко С.В. Ексергетичний аналіз комбінованої схеми H ₂ -дизель + ORC-утилізатор для повільнохідних енергетичних установок	278
Шалапко Д.О., Кухаренко О.О., Мілосердов М.В. Баланс тепловіддачі двотактного суднового дизеля при збагаченні палива 0,15 мас.% водню	282
Шалапко Д.О., Брезгун Т.Г. Моделювання життєвого циклу мікро-H ₂ / дизельного палива для буксирів: порівняння з e-NH ₃ та LNG-DF	288
Поліщук В.А., Гончаров О.М., Мельников О.Г. Enhancing the performance characteristics of high-speed steel tools and gears through combined thermochemical treatment	292
Кузнецов Г.В., Харитонов Ю.М. Програма дослідження моделі теплового акумулятора для дизельного двигуна	296
Боду С.Ж., Сорокін Д.А. Методи нарізання бочкоподібних зубців суднових зубчастих муфт	300
Боду С.Ж., Гудь Д.С. Інструмент для підвищення зносостійкості зубчастих поверхонь	303
Шаповалов Ю.О., Семенов М.М., Головня А.П., Романюкін Є.М. Інтегрована система автономного теплопостачання на базі турбокаміна з термоелектричним модулем для суднових і прибережних енергосистем	306
Шаповалов Ю.О., Семенов М.М., Єлкін В.В., Смірнова О.О. Підвищення надійності компресорних станцій шляхом впровадження тригенераційних енергетичних систем	308
Соломонюк Д.М., Семенов М.М., Шаповалов Ю.О., Плужник Я.В. Дослідження ефективності мікротурбінних когенераційних установок у комунальній енергетиці	310

Новошицький А.В., Боду С.Ж., Фабріцієв Д.В., Нартя О.Ю. Застосування рішення задачі жорсткопластичного згину розтягнутої штаби для визначення параметрів технології виготовлення тонкостінних деталей	313
Новошицький А.В., Боду С.Ж., Фабріцієв Д.В., Гриник М.Г. Виготовлення тонкостінних плоских деталей теплообмінних апаратів зі сферичними виступами та заглибленнями	315
Діасамідзе Б.Т., Кісаров-Дагнер О.Л., Зайцев А.М. Застосування гібридних та альтернативних джерел енергії у судновій енергетиці: стан, проблеми та перспективи	318
Єпіфанов О.А., Пацурковський П.А. Розвиток технологій виробництва аміаку – перспективного палива для суднової енергетики	324
Сазін С.В., Куропятник О.А. Визначення впливу рециркуляції випускних газів на експлуатаційні показники суднових дизелів	329
Куропятник О.А. Використання палива класу HVO для забезпечення екологічності роботи суден морського транспорту	335
Нікончук С.В. Підвищення енергоефективності теплових процесів і мінімізація утворення парогазової фази (BOG) у системах зберігання та регазифікації LNG (FSRU)	339
Боду Д.Ж. Дослідження впливу розподілу температур на процеси теплопередачі та ефективність теплообмінників	350
Мелех Д.М. Аналіз перспектив застосування водневого палива в суднових двигунах	355
Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б., Олійник О.О. Аміак як альтернативне паливо для морських суден: екологічні переваги та виклики	362
Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б., Тукасер Д.Д. Аналіз систем утилізації теплоти суднових малооборотних дизелів	368
Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б., Куделя П.М. Сучасні засоби утилізації теплоти (WHR) на малооборотних дизельних двигунах Wartsila	373
Андрєєв А.А., Вагін Ф.І., Зайцев К.В. Перспективи впровадження суднових сонячних енергетичних установок	377
Andreiev A., Kaliuzhnyi M. Use of ammonia in marine vessel recycling power plants	381
Слюсаренко В.В. Стан і перспективи використання низькотемпературних паливних елементів в енергетичних системах пасажирських суден	385
Simanenko A., Akimov O., Dzygar A. Integration of knowledge on alternative energy sources into maritime engineering education	391

CONTENTS

PLENARY SESSION

Korobko V.V. Modern Trends in Marine Power Engineering and Ship Energy Efficiency Improvement	3
Varbanets R.A., Minchev D.S., Kucherenko Yu.M., Kyrilash O.I. Method of parallel monitoring of the working process in a marine diesel cylinder (cylinder pressure + vibroacoustics)	5
Dolganov I., Przybysz K., Duisebayeva A. Optimization of Wire-Mesh Sensors for Multiphase Flow Measurement with Extended Capabilities	7

Cherednichenko O.K., Zhmurchenko L.O. Improving energy efficiency of thermochemical fuel processing modules by utilizing waste heat in energy complexes	12
Savushkin V.V. Hybrid neural network – a modern tool for analyzing and predicting the thermal state of turbine blades	17
Hohorenko O.A., Nemchenko A.V. Improving the data acquisition system in research on charge air coolers of marine ICEs	22
Kuznetsov V.V., Kuznetsova S.A. Innovative heat exchange surfaces of marine waste heat boilers	30

SECTION 1. IMPROVING THE EFFICIENCY OF SHIP POWER PLANTS DURING DESIGN AND OPERATION

Halai A.I. Shipbuilding in China: development prospects	34
Samokhvalov V.S., Kobalava H.O., Voinov O.P. On the influence of the elastomeric propeller shape and its oscillation direction on the thrust generated	44
Nalyvaiko V., Oliinyk O., Avdiunin R. ANSI standards for shipboard power plant design and operation.....	47
Dymo B.V., Kolbasenko O.V., Anastasenko S.M. Improving the efficiency and reliability of SPP elements when burning water-fuel emulsions	52
Hrych A.V. Influence of two-stage air cooling on reducing harmful emissions by gas engines of an autonomous thermal power plant	57
Voloshyn A.Yu., Borysov A.V. Improving the functioning efficiency of mine defense ships by rationalizing technical means management.....	60
Shumylo O.M., Kononova O.M., Rossomakha O.A. Ensuring energy efficiency of passenger ships when creating a mathematical model of dimensional modernization.....	63
Trotsiuk S.V., Filtanovych M.S., Borysenko V.O., Fediuk D.A., Shalia D.O. Analysis of possible ways to improve environmental and economic indicators of marine engines through fuel system modernization	72
Mytrofanov O.S., Snisar O.E., Zavorodnii D.E., Bilohrud M.M., Biliachat O.M. Research on the efficiency of applying thermochemical waste heat recovery of exhaust gases for an automobile engine	75
Mytrofanov O.S., Fedyk I.I., Ivasiuk S.V., Maherramov R.A., Pietkov Yu.P. Research on the influence of fuel equipment tuning parameters on effective indicators of a marine low-speed engine	78
Lysykh A.Yu., Dotsenko S.M., Klymchuk V.P., Tsybulko Ye.S., Filipishyn B.V. Improving the environmental friendliness of ship power plants by using alternative fuel.....	81
Hrytsuk I.V., Pohorletskyi D.S., Dzyhar A.K., Zadorozhnii V.K., Dovbnia P.Yu., Havryliuk V.V. Features of assessing the state of marine heat exchangers based on digital twin technology	84
Samarin O.Ye., Kalchenko V.V., Nikitin V.D., Kovalchuk O.V., Liashuk A.V., Prokopchuk O.I. Improving the design of the crosshead mechanism of a marine low-speed diesel engine	89
Samarin O.Ye., Khudiakov I.V., Pshenychnyi M.S., Stukal V.O., Filonenko B.V., Frolov I.S. Improving the design of the diesel fuel system	93

Diasamidze B.T., Kavich M.I., Borysov A.V. Impact of modern maritime piracy on shipping safety and ship power plant efficiency: analysis of international conventions	98
Zubarev A.A., Voitenko Ye.O. Analysis of ways to improve environmental indicators of marine engines.....	105
Riazantsev P.A. Review analysis of the use and capabilities of low-temperature fuel cells in the transport fleet.....	108
Nalyvaiko V.S., Avdiunin R.Yu., Boitsov O.O. Determining the power of main engines of LNG tankers	111
Sarabun A.A., Petryk R.V., Kupinets L.K., Sheremet O.A. Analysis of ways to improve the efficiency of power plants of container ships and bulk carriers.....	118
Slinko O.H., Boichuk A.S., Kozlovskiy S.V. Combined thermodynamic cycle of a diesel-gas turbine plant with an energy-refrigerating unit	124
Svyrydov V.I., Moiseienko Yu.I. Reasons for detecting vibration of plain bearings	131
Savchenko V.S. Using WAPS in the ship propulsion complex.....	134
Halai A.I. Ship-hull drag reduction via the Damen air cavity system.....	140
Bondarenko M.S., Cherednichenko O.K. Analysis of characteristics of a steam turbine plant of a Korean-built gas carrier.....	144
Kisietov Yu.V., Lychko B.M. Features of modern planned maintenance systems for SPP ...	152
Akimov O., Nahrybelnyi Y. Modern approaches to the technical management of shipping companies' fleets.....	160

SECTION 2. IMPROVEMENT OF WORKING PROCESSES IN ELEMENTS OF SHIP POWER PLANTS

Kozlovskiy A.V., Diasamidze B.T. Experimental studies of a low-current plasma intensifier in a dual-fuel gas turbine combustion chamber system	164
Yekushenko O.A., Zavadskiy M.S., Krykunenko D.S., Lishchenko S.S., Bilousov Ye.V. Representation of numerical profiles of the internal combustion engine working process in PV-coordinates.....	168
Weixing Liu, Wanting Hu, Kuznetsov V. Improving workflows in ship propulsion system elements: challenges and prospects.....	172
Hrabovenko O.I., Petrenko S.V. Features of using vegetable oils as fuel for low-power diesel engines.....	175
Pohorletskiy D.S., Khudiakov I.V., Olieinikov S.V., Hrytsuk I.V. Improving fuel purification for engines of ship power plants	180
Shvets I.A. Promising technological ways of processing soybean oil into fuel for diesel engines.....	187
Poznanskyi A.S., Tsybal A.A., Chibisov V.S., Shevchuk D.V., Yakovenko O.P. Methods for monitoring and assessing the state of internal combustion engines in ship power plants	191
Poznanskyi A.S., Bondar M.D., Kapura I.A., Kyrychenko O.S., Medvediev O.M. Improving the ignition system of a marine gas engine by applying the prechamber-torch principle.....	194
Tkach M.R., Zoloty Yu.H., Halynkin Yu.M., Monakhov A.A., Strelchenko E.S. Piston strength under dynamic loading conditions	197

Bekov B.A., Shevtsov A.P. Substantiation of evaporative air cooling sections by guide vanes in axial compressors of a gas turbine engine.....	202
Svyrydov V.I., Verzun R.R. Physico-technical analysis of marine pumping equipment functioning processes	204
Svyrydov V.I. Influence of rolling surface wear defects on the reliability of pumping equipment operation	207
Dudar O.Yu. Modernization of a bulk carrier propulsion plant	209
Smetankina N., Morhun S. Experimental methodology for the gas turbine engine rotors fatigue strength study	212
Morhun S., Bushynskii D., Lukyanenko V. Gas turbine engine rotors forced vibration and fatigue study under the non-stationary three dimension gas flow influence	214
Morhun S., Semenov M. Gas turbine engine flame tubes free vibration study	216
Kuznetsov V.V., Cherednichenko O.K., Kuznetsova S.A. Improvement of the weight and size indexes of offshore gas production platforms power plants by using gas turbine plants with thermochemical waste heat recovery	218

SECTION 3-4. ENERGY-SAVING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN MARINE POWER ENGINEERING. WAYS TO IMPROVE TRAINING OF MARINE POWER ENGINEERING SPECIALISTS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Pohorletskyi D.S., Dzyhar A.K. Methanol as a fuel for engines of ship power plants.....	221
Patlaichuk V.M., Kozyrko O.A. Use of box-coolers in centralized cooling systems of ship power plants	227
Patlaichuk V.M., Kozyrko O.A. Estimation of the thermal load on the ship's cooling system from gas turbine engines and their systems	231
Serbin S.I., Patlaichuk O.V. Comparative analysis of the efficiency of exhaust gas afterburning for a marine SOFC-GT system.....	235
Nalyvaiko V.S., Avdiunin R.Yu. Exploring Excellence for next-generation internal combustion engine design	240
Avdiunin R.Yu., Zahrai Ye.V. The application of pulsed magnetic fields in crankshaft repair technology	244
Drozd O.V., Solomentsev O.I., Kukharenko O.O. Influence of hydrogen as an additive to HVO on the formation of nitrogen oxides in diesel combustion	248
Kolesnykov O.V., Solomentsev O.I., Shalapko H.H. Application of intelligent control to stabilize engine operating modes on HVO–H ₂	253
Shalapko D.O., Vahin F.I., Savchenko V.S. Building a digital twin of the combustion process in a marine engine on alternative fuel	256
Drozd O.V., Kolesnykov O.V., Kukharenko O.O. Features of using hydrotreated vegetable oil (HVO) and hydrogen in marine diesel engines	259
Solomentsev O.I., Kukharenko O.O., Khlan M.D. Analysis of thermodynamic parameters of combustion of HVO–H ₂ mixture in a marine diesel.....	264
Shalapko D.O., Shatailov A.O. Micro-impurities of H ₂ in diesel fuel: experimental visualization and influence on spray kinetics at 200 MPa	268

Shalapko D.O., Afanasievskiy O.S. Current state and prospects for the use of small hydrogen impurities in marine diesel engines	273
Shalapko D.O., Shalapko H.H., Stetsenko S.V. Exergetic analysis of a combined H ₂ -diesel + ORC-utilizer scheme for low-speed power plants	278
Shalapko D.O., Kukharenyk O.O., Miloserdov M.V. Heat transfer balance of a two-stroke marine diesel engine with fuel enrichment 0.15 wt.% hydrogen	282
Shalapko D.O., Brezhun T.H. Modeling the life cycle of micro-H ₂ / diesel fuel for tugs: comparison with e-NH ₃ and LNG-DF	288
Polishchuk V.A., Honcharov O.M., Melnykov O.H. Enhancing the performance characteristics of high-speed steel tools and gears through combined thermochemical treatment.....	292
Kuznetsov H.V., Kharytonov Yu.M. Research program for a thermal accumulator model for a diesel engine.....	296
Bodu S.Zh., Sorokin D.A. Methods of cutting barrel-shaped teeth of marine gear couplings	300
Bodu S.Zh., Hud D.S. Tool for increasing wear resistance of gear surfaces	303
Shapovalov Yu.O., Semenov M.M., Holovnia A.P., Romaniukin Ye.M. Integrated autonomous heating system based on a turbo-fireplace with a thermoelectric module for ship and coastal power systems	306
Shapovalov Yu.O., Semenov M.M., Yelkin V.V., Smirnova O.O. Improving the reliability of compressor stations by implementing trigeneration energy systems	308
Solomoniuk D.M., Semenov M.M., Shapovalov Yu.O., Pluzhnyk Ya.V. Research on the efficiency of microturbine cogeneration units in municipal energy	310
Novohytskyi A.V., Bodu S.Zh., Fabritsyev D.V., Nartia O.Yu. Applying the solution of the rigid-plastic bending problem of a stretched strip to determine technology parameters for manufacturing thin-walled heat exchanger parts	313
Novohytskyi A.V., Bodu S.Zh., Fabritsyev D.V., Hrynyk M.H. Manufacturing thin-walled flat parts of heat exchangers with spherical protrusions and depressions.....	315
Diasamidze B.T., Kisarov-Dahner O.L., Zaitsev A.M. Application of hybrid and alternative energy sources in marine power engineering: state, problems, and prospects.....	318
Yepifanov O.A., Patsurkovskiy P.A. Development of ammonia production technologies – a promising fuel for marine power engineering.....	324
Sahin S.V., Kuropiatnyk O.A. Determination of the influence of exhaust gas recirculation on operational indicators of marine diesels.....	329
Kuropiatnyk O.A. Use of HVO class fuel to ensure environmental friendliness of maritime transport operation.....	335
Nikonchuk S.V. Improving energy efficiency of thermal processes and minimizing the formation of boil-off gas (BOG) in LNG storage and regasification systems (FSRU)	339
Bodu D.Zh. Research on the influence of temperature distribution on heat transfer processes and heat exchanger efficiency	350
Melekh D.M. Analysis of prospects for using hydrogen fuel in marine engines	355
Andreiev A.A., Andreieva N.B., Oliinyk O.O. Ammonia as an alternative fuel for sea vessels: environmental benefits and challenges	362

Andreiev A.A., Andreieva N.B., Tukaser D.D. Analysis of waste heat recovery systems of marine low-speed diesels	368
Andreiev A.A., Andreieva N.B., Kudelia P.M. Modern waste heat recovery (WHR) means on Wartsila low-speed diesel engines	373
Andreiev A.A., Vahin F.I., Zaitsev K.V. Prospects for the implementation of marine solar power plants	377
Andreiev A., Kaliuzhnyi M. Use of ammonia in marine vessel recycling power plants	381
Sliusarenko V.V. Status and prospects of using low-temperature fuel cells in energy systems of passenger ships.....	385
Simanenkov A., Akimov O., Dzygar A. Integration of knowledge on alternative energy sources into maritime engineering education.....	391

Наукове видання

СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА: СТАН ТА ПРОБЛЕМИ

XII Міжнародна науково-технічна конференція

Матеріали

05–07 листопада 2025 рік

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, пр. Героїв України, 9
Машинобудівний навчально-науковий інститут
м. Миколаїв, вул. Ковальська, 5*

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск Б. М. Личко
Комп'ютерне верстання Б.Т. Діасамідзе

Підписано до друку 17.12.2025 р.
Формат 60/84 1/8. Папір офсетний
Гарнітура «Times New Roman». Друк ризограф.
Ум. друк. арк. 54,29
Тираж 10 шт. Зам. №2/12/2025
Видавець і виготівник Ємельянова Т. В.
пров. Суднобудівний, 7, м. Миколаїв, 54001
Тел.: (0512) 47-74-48, e-mail: printex_nik@ukr.net
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6167 від 03.05.2018 р.