

**Artem A. Andrieiev****Андреев Артем
Андрійович****Nataliya B. Andrieieva****Андреева
Наталія
Борисівна****Oleh I. Solomyentsev**
**Соломенцев
Олег Іванович**

УДК 621.436:621.577:629.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧИХ ЕЖЕКТОРНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING HEAT-RECOVERY EJECTOR REFRIGERATION SYSTEMS

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).07](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).07)

- Artem A. Andrieiev** Андреев Артем Андрійович, канд. техн. наук, доцент
artem.andreev@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6043-3700
- Nataliya B. Andrieieva** Андреева Наталія Борисівна, канд. пед. наук, доцент
nataliia.andrieieva@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0007-8427-3207
- Oleh I. Solomyentsev** Соломенцев Олег Іванович, докт. техн. наук,
професор
oleh.solomentsev@nuos.edu.ua ORCID:
0000-0002-5106-6486

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

Анотація. Мета: Обґрунтувати і кількісно оцінити застосування тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин для додаткового охолодження наддувного повітря суднових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) з метою зниження питомої витрати палива та підвищення ефективності тригенераційних суднових енергетичних контурів. Методика: Застосовано комплексний підхід, що поєднує термодинамічне моделювання циклів ежекторних холодильних машин зі звичайними системами наддуву, аналіз енергетичних балансів і теплових потоків, а також параметричні розрахунки для визначення оптимальних режимів (температури конденсації, температури кипіння випарника, теплового коефіцієнта ζ та співвідношення ступенів стискування при двоступеневому наддуві). Розглянуто інтеграцію генератора пари на відхідних газах і випарника у повітряному контурі двигуна, проаналізовано вплив проміжного охолодження на роботу компресорних ступенів [1-4]. Результати: Показано, що при реалістичних умовах охолоджувальної води ($\approx 25^\circ\text{C}$) і при $\zeta \approx 0,3-0,5$ застосування тепловикористовуючої ежекторної машини дозволяє знижувати температуру повітря на вході в двигун на $\approx 25-30^\circ\text{C}$. Це корелює зі зменшенням питомої витрати палива приблизно на $1,5-2,0 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$ і підвищенням ККД двигуна майже на 2%. При двоступеневому наддуві оптимальне співвідношення ступенів стискування π_{k1}/π_{k2} в діапазоні $\approx 0,8 \dots 1,5$ забезпечує зниження енерговитрат на компресори на 5-15% і вивільнення додаткової потужності для генерації електроенергії або підвищення потужності. Наукова новизна: Запропоновано та аналітично обґрунтовано конфігурації тепловикористовуючих ежекторних контурів,

що інтегруються в судновий повітряну систему та в тригенераційний енергетичний контур; визначено оптимальні термодинамічні параметри для роботи з низькокиплячими робочими речовинами, показано ефективність використання теплоти як наддувного повітря, так і відхідних газів для генерації холодопродуктивності без значного ускладнення суднової системи. Практична значимість: Результати дослідження дають підстави для впровадження компактних, надійних та енергоефективних рішень охолодження наддувного повітря на морських судах, особливо в тропічних умовах, що сприяє зниженню споживання палива, скороченню шкідливих викидів і підвищенню автономності енергетичних установок.

Ключові слова: наддувне повітря; утилізація відхідних газів; проміжне охолодження; співвідношення ступенів стискання; тепловий коефіцієнт; тригенерація суднових установок; R142b, робоча речовина.

Abstract. Purpose: To substantiate and quantitatively evaluate the application of heat-recovery ejector refrigeration machines for additional charge-air cooling of marine internal combustion engines, aiming to reduce specific fuel consumption and enhance the efficiency of shipboard trigeneration energy systems. Methodology: A combined approach was used: thermodynamic cycle modelling of ejector refrigeration integrated with standard charge-air systems, energetic and heat-flow balance analyses, and parametric studies to identify optimal operating conditions (condensing temperature, evaporator boiling temperature, refrigeration performance coefficient ζ , and intercooling pressure ratios for two-stage boosting). Concepts for integrating a waste-gas steam generator and a low-temperature evaporator into the engine air circuit were developed, and the effects of intercooling on compressor power and overall power allocation were examined [1-4]. Results: It is demonstrated that under realistic seawater cooling conditions ($\approx 25^\circ\text{C}$) and with $\zeta \approx 0.3\text{--}0.5$, a heat-recovery ejector refrigeration machine can lower inlet charge-air temperature by approximately $25\text{--}30^\circ\text{C}$. This cooling corresponds to a reduction in specific fuel consumption on the order of $1.5\text{--}2.0\text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ and an increase in engine thermal efficiency of about 2 %. For two-stage boosting, an intercooling pressure ratio $\pi_{k1}/\pi_{k2} \approx 0.8\text{--}1.5$ yields a 5–15 % decrease in compressor electrical power demand and releases additional shaft or electrical power for onboard generation or propulsion support. Scientific novelty: New schematic solutions and thermodynamic parameter sets are proposed for integrating heat-recovery ejector refrigeration into marine engine air systems and shipboard trigeneration layouts; the study identifies practical working-fluid regimes and quantifies the combined use of charge-air and exhaust-gas heat to produce useful cold without a significant increase in system complexity. Practical significance: The findings support deployment of compact, low-maintenance, energy-efficient charge-air cooling solutions on ships – especially in tropical conditions – leading to fuel savings, lower emissions, and improved autonomy of ship energy installations.

Key words: charge-air cooling; waste-gas heat recovery; intercooling pressure ratio; refrigeration performance coefficient; shipboard trigeneration systems; R142b, working fluid; fuel consumption reduction.

References

- [1] Shtanko, O., Litvinova, M., Andrieiev, A., Andrieieva, M., & Savchuk, P. (2020). Building a technological model of the exhaust gas energy recovery device for the diesel engine on small-sized vessel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. V. 1. № 8 (103). pp. 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194938>
- [2] Pyrysunko, M., Radchenko, A., Tkachenko, V., Zubarev, A., & Andreev, A. (2022). Marine diesel engine inlet air cooling by ejector chiller on the vessel route line. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V* (pp. 259–268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25
- [3] Radchenko, N. I., Kalinichenko, I. V., Radchenko, R. N., & Shcherbak, Y. G. (2017). Utilization of steam heat by a waste heat recovery chiller with a heat pump for the cooling of the marine diesel engine intake air. *Aerospace Technic and Technology*, 5, 74–80. <https://doi.org/10.32620/aktt.2017.5.10>
- [4] Kornienko, V., Radchenko, R., Radchenko, M., Pavlenko, A., & Konovalov, D. (2022). Cooling cyclic air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by exhaust heat recovery chiller. *Energies*, 15(1), 248. <https://doi.org/10.3390/en15010248>

- [5] Radchenko, R., Kornienko, V., Radchenko, M., Mikielewicz, D., Andreev, A., & Kalinichenko, I. (2021). Cooling intake air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by ejector chiller. *E3S Web of Conferences*, 323, 00031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300031>
- [6] Konovalov, D. V., Kobalava, H. V., Radchenko, M. I., Radchenko, R. M., & Pavlenko, A. M. (2020). Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling. *E3S Web of Conferences*, 180, 010123. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020180010123>
- [7] Chaker, M., Meher-Homji, C. B., & Mee, T. R. (2002). Inlet fogging of gas turbine engines – Part A: Fog droplet thermodynamics, heat transfer and practical considerations. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. <https://doi.org/10.1115/GT2002-30562>
- [8] Zhang, H., Wang, Y., & Liu, T. (2018). Utilizing the scavenge air cooling in improving the performance of marine diesel engine waste heat recovery systems. *Energy*, 142, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.039>
- [9] Ben Hamida, M. B., Al-Mussawi, W., Shaban, M., & Marefati, M. (2023). Thermoeconomic optimization of a hybrid power and cooling facility using waste heat recovery from a marine diesel engine. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(9), 102067. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102067>
- [10] Guo, Q., Dong, S., Zheng, Q., & Li, J. (2011). Design of marine diesel engine waste heat recovery system with organic Rankine cycle. *Applied Mechanics and Materials*, 148–149, 1264–1270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.1264>
- [11] Sakalis, G. N. (2022). Design and partial load operation optimization of integrated ship energy system based on supercritical CO₂ waste heat recovery cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1404. <https://doi.org/10.3390/jmse10101404>
- [12] Abdu, S., Zhou, S., & Orji, M. (2016). Selection of a waste heat recovery system for a marine diesel engine based on exergy analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 36–51. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.36>
- [13] Mohammed, H. N., Imran, M. S., & Kurji, H. J. (2024). Energy and exergy analysis of thermoelectric generator installed on diesel engine exhaust heat recovery system. *International Journal of Heat and Technology*, 42(6), 2067–2074. <https://doi.org/10.18280/ijht.420624>
- [14] Smith, J. T., & Brown, L. R. (2019). Waste heat recovery in marine diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 182, 579–589. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.065>
- [15] Čepaitis, T., & Lebedevas, S. (2023). Comparative assessment of organic Rankine cogeneration cycle efficiency with secondary heat sources from marine diesel engines. In *Transportation Science and Technology* (pp. 104–115). https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_10
- [16] Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- [17] Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4th ed.). Palgrave Macmillan.
- [18] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- [19] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- [20] Bejan, A. (2016). *Advanced engineering thermodynamics* (4th ed.). Wiley.

Вступ. Економічна та екологічна ефективність суднових двигунів зростає в умовах використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) – теплоти від наддувного повітря і відхідних газів. Збільшення температури наддувного повітря призводить до збільшення питомої витрати палива (b_p) та зменшення ККД; кожні +10 °С підвищення температури наддувного повітря ви-

кликає зростання питомої витрати палива на $\approx 0,6\text{--}0,7\%$ і відповідне зниження ККД. Таке погіршення особливо помітне у тропічних умовах: за стандартом ISO при температурі заборотної води 32 °С температура наддувного повітря перед двигуном досягає $\approx 50\text{--}52$ °С, що наближається до гранично допустимої ≈ 55 °С. Використання традиційних методів охолодження (водяні контури, додатковий забортний теплообмінник) об-

межене через високу температуру морської води та енергетичні витрати насосів. Відомі пропозиції (наприклад, компресорно-привідні фреонові холодильні машини або бромисто-літєві абсорбери) суттєво складні, громіздкі та не знайшли широкого застосування [1-3], [5], [7].

У результаті інтенсивність фазових переходів у існуючих системах утилізації теплоти використана не повністю. Саме тому перспективною є ідея застосування тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин (ТЕХМ) для охолодження наддувного повітря ДВЗ [1-6], [8]. Ежектори мають просту конструкцію (немає рухомих частин, окрім насоса) і високу надійність у суднових умовах. За оцінками, установки, які додатково виробляють холод поруч із електро- та тепловою енергією (тригенераційні системи), можуть суттєво підвищити повний ККД суднових енергетичних установок. Холод, отриманий ТЕХМ, може бути використаний безпосередньо для охолодження наддувного повітря, що дозволить зменшити питому витрату палива та збільшити корисну потужність ДВЗ.

Метою роботи є наукове обґрунтування і моделювання застосування ТЕХМ у судновій енергетиці: аналіз існуючих рішень, розробка схем і визначення оптимальних параметрів ежекторних холодильних машин для охолодження наддувного повітря та техніко-економічного обґрунтування їх використання в тригенераційних енергетичних установках.

Огляд існуючих підходів та постановка задачі. Ефективність ДВЗ суттєво залежить від повітряного контуру і системи наддуву. Підвищення ККД турбокомпресорів і значні температурні напруги в циліндропоршневій групі сучасних малооборотних дизелів спричинили посилення теплового навантаження на охолоджувач наддувного повітря. При цьому традиційна система охолодження наддувного повітря морською водою стає малоефективною: граничний потенціал заборотної води обмежує зниження температури повітря лише до $\approx 45\text{--}50^\circ\text{C}$ [9–11]. Спроби підвищити циркуляцію води обертаються зростанням споживання елек-

троенергії насосами. З іншого боку, частина теплоти відхідних газів ДВЗ втрачається без корисного використання.

У контексті цих завдань застосування тепловикористовуючих холодильних машин (ТЕХМ) є одним із найефективніших рішень. На відміну від громіздких адіабатичних систем охолодження або абсорбційних установок, ТЕХМ мають компактну конструкцію та значний резерв продуктивності завдяки фазовим переходам робочої речовини [9-14]. У таких системах теплота високо- або середньотемпературних джерел (наддувного повітря чи газів) використовується в теплообмінниках: генераторі пари і випарнику низького тиску. Реалізація ТЕХМ дозволяє одночасно виробляти холод, знижуючи температуру повітря, та зменшувати втрати теплового потенціалу двигуна. Це вписується у концепцію тригенерації: комбінованого одержання електроенергії, теплоти та холоду. Холод, отриманий ТЕХМ, використовується для власних потреб суднових ДВЗ, що зменшує питоме споживання палива та підвищує загальну ККД установок.

Постановка наукових задач охоплює: систематизацію літературних даних про охолодження повітря ДВЗ і утилізацію ВЕР; розрахунок і оптимізацію параметрів ТЕХМ (тиск та температура робочого тіла, конденсаційна температура, генераторна температура тощо) за критеріями ККД двигуна і теплового коефіцієнта холодильника; розробку схемної структури холодильного контуру (включно з установленням генератора на відхідних газах та випарника в контурі наддуву) з урахуванням оптимального співвідношення ступенів підвищення тиску наддувних компресорів.

Розробка схем і оптимальних параметрів ТЕХМ. На основі експериментальних даних і термодинамічних моделей розроблено схеми тепловикористовуючих циклів охолодження [15-20]. В одній з ключових конфігурацій генератор пари низькокиплячої робочої речовини (НРТ) високого тиску розташований в газовому тракті двигуна (після турбіни наддуву), а випарник НРТ низького тиску – в контурі наддувного повітря перед двигуном (рис. 1). Повітря після

традиційного водяного інтеркулера надходить у випарник ТЕХМ, де додатково охолоджується низькотемпературним холодом НРТ.

Проведені розрахунки теплових потоків показали, що при температурі води охолодження $\approx 25^\circ\text{C}$ (стандарт ISO) можна прийняти температуру конденсації $t_k \approx 30^\circ\text{C}$. Для робочої речовини R142b при цьому тепловий коефіцієнт ζ ТЕХМ лежить у діапазоні $\approx 0,3\text{--}0,5$. Якщо обмежити температуру відхідних газів після генератора ТЕХМ значенням 180°C , то доступний перепад температур $\Delta t_{yt} \approx 100^\circ\text{C}$. За $\zeta \approx 0,3$ це забезпечує зниження температури повітря на вході двигуна приблизно на 30°C . Такий глибокий перепад температур зменшує питому витрату палива і збільшує ККД двигуна майже на 2%. Значення цих ефектів узгоджуються з результатами випробувань.

Розроблено також комбіновані схеми, де поряд з основним ТЕХМ для наддувного повітря передбачено додаткові термодинамічні ступені (наприклад, проміжне водяне охолодження низького потенціалу чи вторинні ежектори) (рис. 2).

Енергетична ефективність ЕХМ оцінюється тепловим коефіцієнтом $\zeta = Q_0/Q_r$, де Q_0 – холодопродуктивність; Q_r – теплота,

що підводиться в генераторі пари до холодоагенту. Як холодоагент в ЕХМ доцільно використовувати R142b. Залежність теплового коефіцієнта ζ від температури t_k конденсації R142b при різних температурах кипіння у випарнику t_0 і генераторі $t_r = 100$ і 80°C наведено на рис. 2, б і в. При температурі заборотної води 25°C температуру конденсації можна прийняти рівною $t_k = 30^\circ\text{C}$. Значення теплового коефіцієнта ζ при цьому лежать у діапазоні $0,3\text{--}0,5$. Це означає, що при $\zeta = 0,3$ і градієнті температур $\Delta t_{yt} = 100^\circ\text{C}$ температуру повітря на вході в дивун можна зменшити приблизно на 30°C . Це дозволяє зменшити питому ефективну витрату палива b_e і збільшити ефективний ККД двигуна η_e приблизно на 2%. Одержуваний в ЕХМ низькотемпературний холод доцільно використовувати для глибокого охолодження повітря на вході в ДВЗ, яке неможливо здійснити заборотною водою.

Для визначення оптимальних параметрів наддувного повітря з проміжним його охолодженням виконано розрахунки залежності витрат потужності наддувного турбокомпресора від співвідношення ступенів стискання π_{k1}/π_{k2} при різних температурах стисненого повітря після проміжного охолоджувача ($t_{\text{по2}}$) та різних температурах зо-

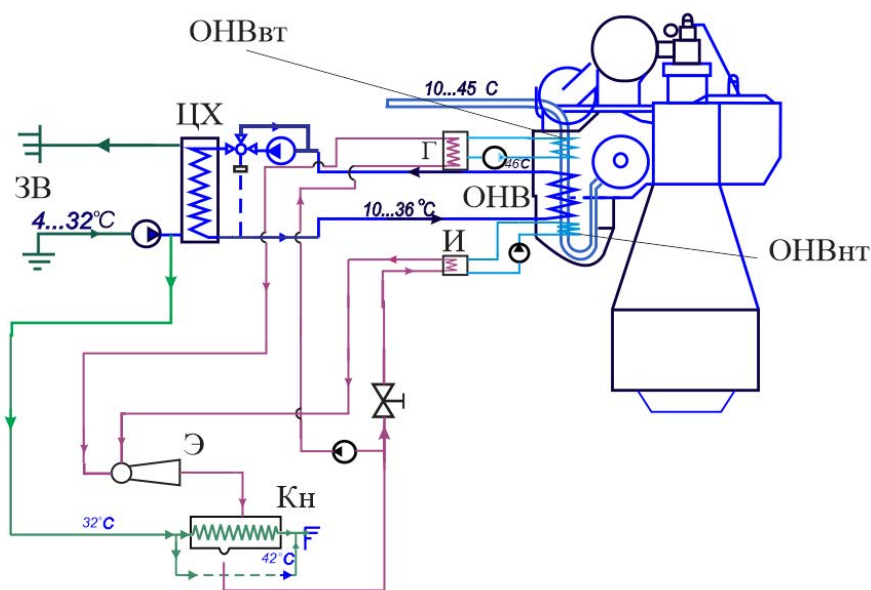


Рис. 1. Досліджувана система охолодження наддувного повітря для ДВЗ на базі ТЕХМ ОНВВТ та ОНВНТ – високо- та низькотемпературні секції охолоджувача наддувного повітря; ЦХ – центральний холодильник; ОНВ – водна секція охолоджувача наддувного повітря; ЗВ – забортна вода; Г – генератор ТЕХМ; И – випарник ТЕХМ; КН – конденсатор; Е – ежектор ТЕХМ

внішнього повітря на вході ($t_{\text{вх}}$). За базовий варіант прийнято одноступеневий турбокомпресор без проміжного охолодження з загальним ступенем стисання 4. Результати подано у вигляді залежності відношення $N/N_{\text{ПО}}$ (потужність базового компресора без промохолодження N до потужності двоступеневого компресора з промохолодженням $N_{\text{ПО}}$) від відношення $\pi_{\text{к1}}/\pi_{\text{к2}}$ при температурах стисненого повітря після ПО $t_{\text{ПО2}} = 20, 40, 60$ і 80 °С та повітря на вході $t_{\text{вх}} = 40$ і 20 °С (рис. 3).

Як видно з рис. 3, для суднових двигунів внутрішнього згоряння з проміжним охолодженням існує раціональне значення відношення $\pi_{\text{к1}}/\pi_{\text{к2}}$, що забезпечує зниження витрат потужності наддувного агрегату на 5...15% і знаходиться в діапазоні 0,8...1,5, причому із зменшенням $t_{\text{ПО2}}$ (збільшенням глибини охолодження) екстремуми зростають і зміщуються в бік менших величин $\pi_{\text{к1}}/\pi_{\text{к2}}$, що можливо лише за наявності машинного холоду. У такому випадку компоновка ежекторної холодильної машини (ЕХМ) на НРТ повинна передбачати встановлення її парогенератора НРТ високого тиску (силовий контур ЕХМ) для викорис-

тання відносно високотемпературного теплового потенціалу наддувного повітря, а також включення випарника між компресорними ступенями для охолодження повітря до низьких температур ($t_{\text{ПО2}} = 20...40$ °С). Якщо машинного холоду недостатньо, можливе паралельне підключення додаткового парогенератора, який відбирає тепло від відхідних газів ДВЗ – тобто два генератори ЕХМ можуть працювати паралельно на один випарник.

Схематичне рішення інтеграції ТЕХМ у тригенераційний енергетичний контур судна полягає в поєднанні: 1) електрогенератора судової АЕС/ГТУ на валу ДВЗ, 2) утилізаційного генератора пари на відхідних газах, 3) ежекторної холодильної установки в контурі повітря, 4) використанні отриманого холоду для власних потреб двигуна (охолодження наддуву або кондиціювання). Така система одночасно виробляє електроенергію, гарячу воду та холод для охолодження наддувного повітря, що відповідає принципам тригенерації.

Для перевірки передбачуваного ефекту від застосування ТЕХМ на судах із судовою енергетичною установкою з

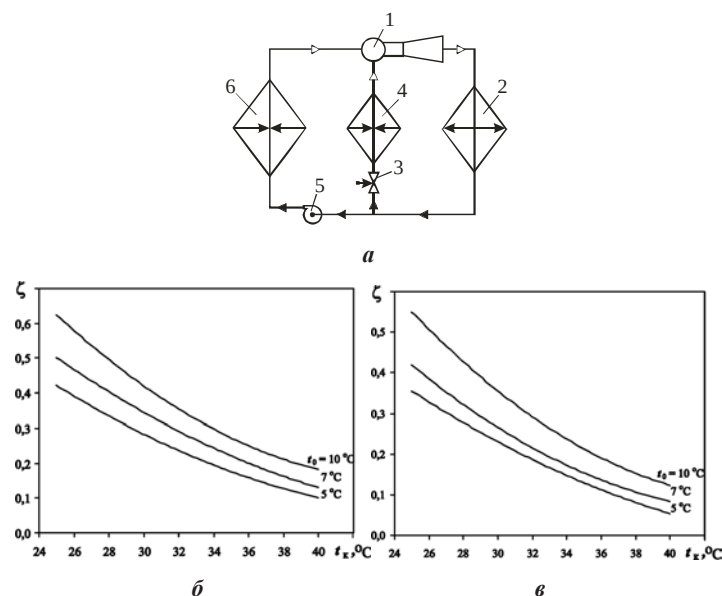


Рис. 2. Схема ЕХМ (а) і залежність її теплового коефіцієнта ζ від температури конденсації $t_{\text{к}}$ при різних температурах кипіння у випарнику t_0 і генераторі $t_{\text{г}} = 100$ °С (б) і 80 °С (в): 1 – ежектор; 2 – конденсатор; 3 – дросельний вентиль; 4 – випарник-охолоджувач повітря; 5 – насос; 6 – генератор робочої пари

малооборотним дизелем були отримані дані натурних випробувань на судні, що експлуатується. Випробування проводили на судні-контейнеровозі «MAERSK SEMARANG» дедвейтом 89400 т. Під час експлуатації його на рейсовій лінії Ріо-де-Жанейро (Бразилія) – Гамбург (Німеччина) у серпні–жовтні 2012 року проводилися вимірювання параметрів головного двигуна (12K98MC-C фірми МАН) та параметрів навколишнього середовища. У результаті дані були оброблені та представлені графічно нижче. Слід зазначити, що проглядається явна тенденція зменшення споживання палива при зниженні температури забортної води (а отже, і температури наддувного повітря).

Відповідно до режимів експлуатації проводилися вимірювання різних параметрів МОД (12K98MC-C), зокрема температури в наддувному ресивері, температури в МО, витрати палива. Усі виміри є повністю автоматизованими, результат оброблявся за допомогою ЕОМ у реальному часі. Так було виміряно значення температур, потужності МОД та витрат палива при різних темпера-

турах повітря в наддувному ресивері.

Залежність питомої витрати палива двигуна b_e від температури наддувного повітря t_s при постійному навантаженні і різних температурах повітря на вході $t_{\text{нв}}$ представлена на рис. 4. А порівняння питомої витрати палива двигуна b_{eP} , розрахованого за математичною моделлю та отриманого експериментально b_{eE} на рис. 5.

Як бачимо, розрахункові значення b_{eP} задовільно узгоджуються з експериментальними b_{eE} : розбіжність не виходить за межі довірчого інтервалу 4% при нормальному розподілі похибки (при довірчій ймовірності виміряних величин 0,95) та довірчого інтервалу 6% (при довірчій ймовірності 0,997).

Результати і їх інтерпретація. Проведені розрахунки і досліди доводять ефективність використання ТЕХМ. При середньому значенні $\zeta \approx 0,3$ та $\Delta t_{\text{гт}} = 100$ °C наддувне повітря може охолоджуватися до 25–35 °C, що забезпечує економію палива ~1,5–2,0 г/(кВт·год) та прибавку потужності двигуна ~2%. Ці значення корелюють з літературними даними: показано, що температура по-

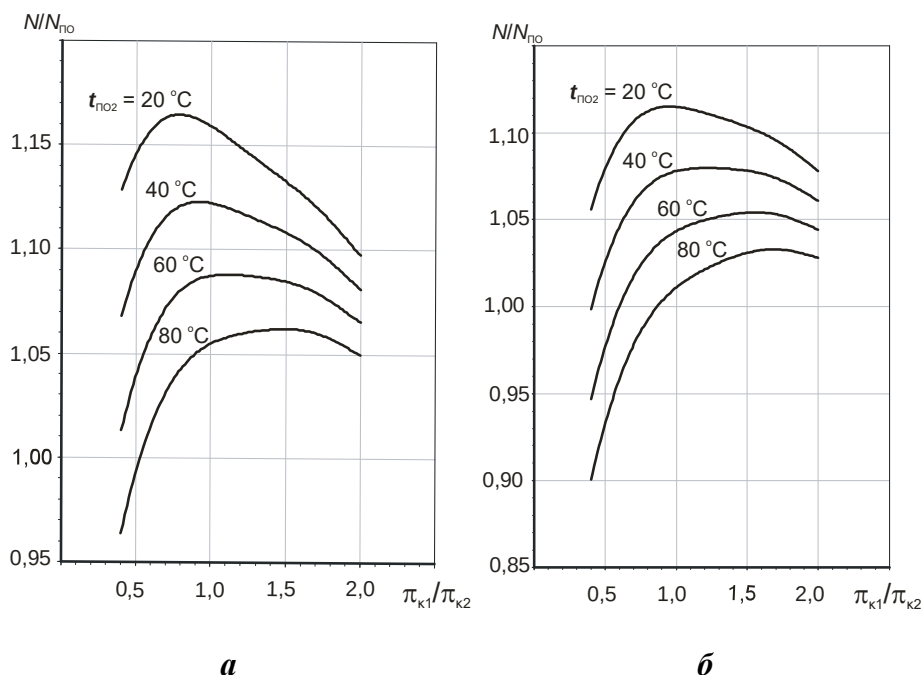


Рис. 3. Залежності відношення потужностей компресорів $N/N_{\text{по}}$ від відношення π_{k1}/π_{k2} ступенів стискування компресорних ступенів при різних температурах $t_{\text{по2}}$ повітря після проміжного охолодження та температурах повітря на вході $t_{\text{вх}} = 40$ °C (а) і 20 °C (б): потужності компресорів N – без промохолодження і $N_{\text{по}}$ – з промохолодженням; ступені стискування компресорних ступенів π_{k1} – низького і π_{k2} – високого тиску

вітря падає на $\approx 10^\circ\text{C}$ за рахунок утилізації лише теплоти відхідних газів, що зменшує b_e на 1,0–1,2 г/(кВт·год); з додаванням теплоти наддувного повітря вираш у споживанні палива майже подвоюється.

Обґрунтування ефективності: Зниження температури впускного повітря покращує умови сумішоутворення і скорочує теплові втрати в циліндропоршневій групі. Відпо-

відно, паливо перетворюється на механічну роботу ефективніше, зменшуються викиди та утворення оксидів азоту. Додатково, зниження навантаження на водяний контур охолодження зменшує споживання води і електроенергії насосами. Таким чином, ТЕХМ фактично підсилює енергобаланс двигуна: створює холод із “безкоштовного” тепла, що призводить до сумарного підвищення ККД

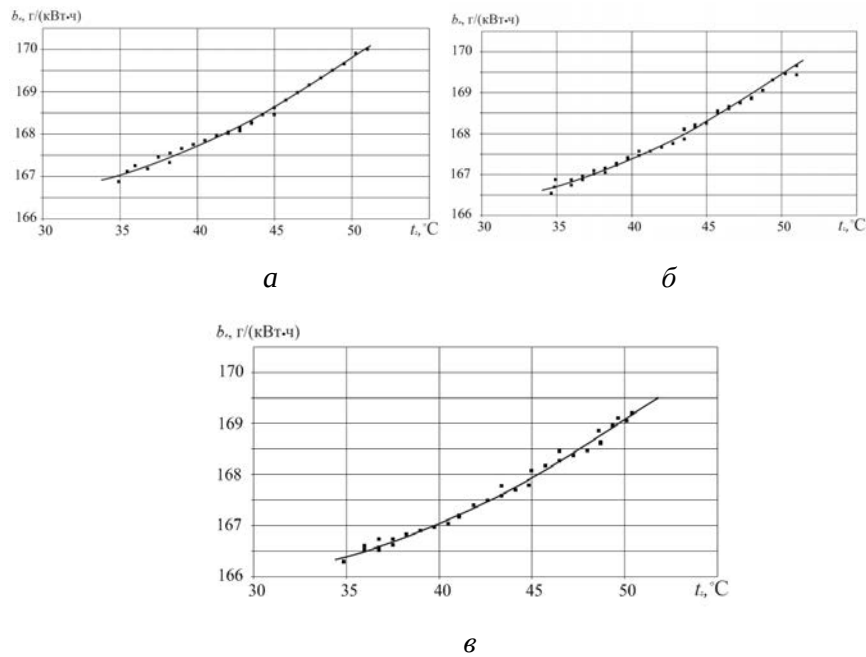


Рис. 4. Питома витрата палива двигуна b_e в залежності від температури наддувного повітря t_s при постійному навантаженні та різних температурах на вході у компресор t_{nb} ($a - t_{nb} = 45^\circ\text{C}$ $\delta - t_{nb} = 40^\circ\text{C}$, $в - t_{nb} = 35^\circ\text{C}$)

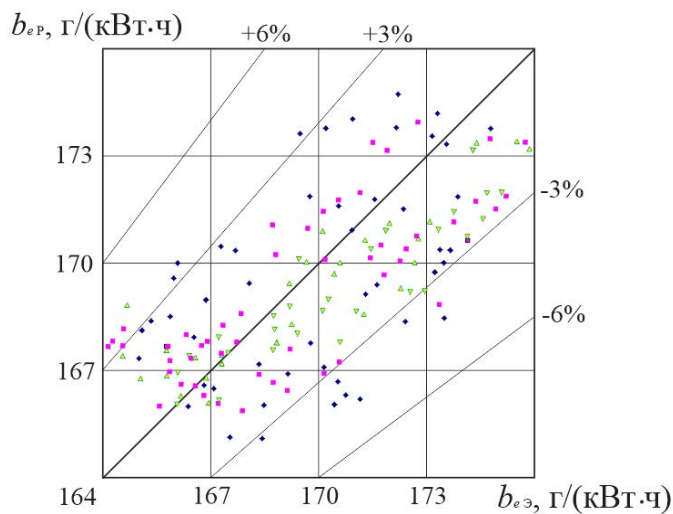


Рис. 5. Порівняння питомої витрати палива двигуна $b_{e,р}$ розрахованої за математичною моделлю та отриманої експериментально $b_{e,з}$, $\Delta - t_s = 35\text{--}40^\circ\text{C}$; $\blacksquare - t_s = 40\text{--}45^\circ\text{C}$

суднової енергетичної установки.

Висновки

1. Впровадження тепловикористовуючих ежекторних холодильних машин дозволяє ефективно охолоджувати повітря на вході в двигун за рахунок теплоти наддувного повітря та/або відхідних газів. Розрахунки показують, що схеми ТЕХМ забезпечують зниження температури впускного повітря на $\sim 25\text{--}30^\circ\text{C}$ з відповідним приростом потужності і підвищенням ККД на $\approx 2\%$. Реалізація ТЕХМ на базі НРТ (наприклад, R142b) з $\zeta \approx 0,3\text{--}0,5$ є технічно здійсненою і доцільною для суднових енергетичних установок.

2. Встановлено раціональні параметри проміжного охолодження при двоступеневому наддуві: оптимальне співвідношення тисків $\pi_{k1}/\pi_{k2} \approx 0,8\text{--}1,5$ забезпечує зниження потужності наддувного агрегату на $5\text{--}15\%$ і відповідне підвищення долі потужності утилізаційної цих систем суден.

турбіни. Ці умови дозволяють набути додаткову потужність ДВЗ для генерації електроенергії або підвищення тягового режиму судна.

3. Розроблені схемні рішення тепловикористовуючих контурів із залученням ТЕХМ демонструють практичну доцільність тригенерації на судні. Використання високого потенціалу теплоти наддувного повітря та газів на генераторі парів і глибоке охолодження впускного повітря на випарнику створюють комплексну систему, що виробляє холод, тепло та електроенергію з максимальною ефективністю.

Прикладне значення: Запропоновані рішення забезпечують зниження паливної витрати двигунів морських суден та зменшення шкідливих викидів. Реалізація ТЕХМ сприятиме адаптації суднових енергетичних установок до тропічних умов, зростанню автономності та ергономічності енергетич-

Список літератури

- [1] Shtanko, O., Litvinova, M., Andrieiev, A., Andrieieva, M., & Savchuk, P. (2020). Building a technological model of the exhaust gas energy recovery device for the diesel engine on small-sized vessel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. V. 1. № 8 (103). pp. 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.194938>
- [2] Pyrysunko, M., Radchenko, A., Tkachenko, V., Zubarev, A., & Andreev, A. (2022). Marine diesel engine inlet air cooling by ejector chiller on the vessel route line. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V* (pp. 259–268). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_25
- [3] Radchenko, N. I., Kalinichenko, I. V., Radchenko, R. N., & Shcherbak, Y. G. (2017). Utilization of steam heat by a waste heat recovery chiller with a heat pump for the cooling of the marine diesel engine intake air. *Aerospace Technic and Technology*, 5, 74–80. <https://doi.org/10.32620/akt.2017.5.10>
- [4] Kornienko, V., Radchenko, R., Radchenko, M., Pavlenko, A., & Konovalov, D. (2022). Cooling cyclic air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by exhaust heat recovery chiller. *Energies*, 15(1), 248. <https://doi.org/10.3390/en15010248>
- [5] Radchenko, R., Kornienko, V., Radchenko, M., Mikieliewicz, D., Andreev, A., & Kalinichenko, I. (2021). Cooling intake air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by ejector chiller. *E3S Web of Conferences*, 323, 00031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132300031>
- [6] Konovalov, D. V., Kobalava, H. V., Radchenko, M. I., Radchenko, R. M., & Pavlenko, A. M. (2020). Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling. *E3S Web of Conferences*, 180, 010123. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2020180010123>
- [7] Chaker, M., Meher-Homji, C. B., & Mee, T. R. (2002). Inlet fogging of gas turbine engines – Part A: Fog droplet thermodynamics, heat transfer and practical considerations. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. <https://doi.org/10.1115/GT2002-30562>
- [8] Zhang, H., Wang, Y., & Liu, T. (2018). Utilizing the scavenge air cooling in improving the performance of marine diesel engine waste heat recovery systems. *Energy*, 142, 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.039>
- [9] Ben Hamida, M. B., Al-Mussawi, W., Shaban, M., & Marefati, M. (2023). Thermoeconomic optimization of a hybrid power and cooling facility using waste heat recovery from a marine diesel engine. *Ain*

Shams Engineering Journal, 14(9), 102067. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102067>

- [10] Guo, Q., Dong, S., Zheng, Q., & Li, J. (2011). Design of marine diesel engine waste heat recovery system with organic Rankine cycle. *Applied Mechanics and Materials*, 148–149, 1264–1270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.1264>
- [11] Sakalis, G. N. (2022). Design and partial load operation optimization of integrated ship energy system based on supercritical CO₂ waste heat recovery cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1404. <https://doi.org/10.3390/jmse10101404>
- [12] Abdu, S., Zhou, S., & Orji, M. (2016). Selection of a waste heat recovery system for a marine diesel engine based on exergy analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 36–51. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.36>
- [13] Mohammed, H. N., Imran, M. S., & Kurji, H. J. (2024). Energy and exergy analysis of thermoelectric generator installed on diesel engine exhaust heat recovery system. *International Journal of Heat and Technology*, 42(6), 2067–2074. <https://doi.org/10.18280/ijht.420624>
- [14] Smith, J. T., & Brown, L. R. (2019). Waste heat recovery in marine diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 182, 579–589. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.065>
- [15] Čepaitis, T., & Lebedevas, S. (2023). Comparative assessment of organic Rankine cogeneration cycle efficiency with secondary heat sources from marine diesel engines. In *Transportation Science and Technology* (pp. 104–115). https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_10
- [16] Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- [17] Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4th ed.). Palgrave Macmillan.
- [18] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- [19] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- [20] Bejan, A. (2016). *Advanced engineering thermodynamics* (4th ed.). Wiley.

© Андрєєв А. А., Андрєєва Н. Б., Соломенцев О. І.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0