



УДК 004.2

ТHERMOCHEMICAL HEAT RECOVERY IN MOBILE POWER PLANTS ТЕРМОХІМІЧНА РЕГЕНЕРАЦІЯ ТЕПЛА В УСТАНОВКАХ МОБІЛЬНИХ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСІВ

Cherednichenko O.S. / Чередніченко О.К.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

Korobeynikova N.V. / Коробсїнікова Н.В.

*Assistant / асистент**Admiral Makarov National University of Shipbuilding,**Mykolaiv, Heroiv Ukrainy Ave., 9, 54025**Національний Університет Кораблебудування імені адмірала Макарова,**Миколаїв, пр-т Героїв України, 9, 54025*

Анотація. Розглянуто схеми сучасних мобільних енергетичних комплексів на прикладі суден з електрорухом. Проаналізовано умови застосування у складі таких комплексів газотурбінних установок зі спільною термодинамічною та термохімічною регенерацією. Встановлено потенціальні можливості для зниження питомої витрати палива та напрям подальшого удосконалення судових енергетичних установок.

Ключові слова: енергетичний комплекс, газотурбінна установка, регенерація тепла, конверсія палива

Вступ.

Сучасні тенденції розвитку енергетичних комплексів низки мобільних об'єктів, зокрема енергетичних установок високотехнологічних суден, пов'язані з реалізацією схеми єдиної електроенергетичної установки [1], що дає змогу забезпечити вироблення електроенергії для пропульсивного або технологічного комплексу та загальносуднових споживачів в одних агрегатах. Аналіз складу енергетичних установок спеціалізованих суден FPSO, плавучих електростанцій, морських бурових платформ показує, що понад 50% таких комплексів створено на базі газотурбінних установок (ГТУ). Досить широкого поширення ГТУ набули і на пасажирських суднах [2].

Потужність ЕУ таких суден водотоннажністю понад 65 тис. т. може перевищувати 100 МВт. Наразі у складі енергетичних установок сімнадцяти круїзних лайнерів встановлено 26 ГТД.

Для нових суден характерне зростання водотоннажності та швидкості ходу, і, як наслідок, потужності енергетичної установки (ЕУ). Вибір типу і складу ЕУ є складним завданням. Енергетична установка повинна забезпечувати необхідні показники надійності та живучості за високої енергоефективності та помірних масогабаритів. Обов'язковим є виконання вимог Додатка VI до Конвенції МАРПОЛ 73/78, що передбачає контроль питомої емісії оксидів азоту NO_x і вмісту оксидів сірки (SO_2 і SO_3) у газах, що відходять, судових теплових двигунів і котлів. У зонах прибережного мореплавства, затоках, внутрішніх морях ці вимоги контролюються дуже жорстко, у таких зонах діють і регіональні норми боротьби із забрудненням атмосфери.

Для круїзного лайнера водотоннажністю 80 тис. тон потреби пропульсивного комплексу становлять близько 40 МВт на повному ході, під час стоянки з пасажирями на борту потрібно 7-9 МВт електроенергії. Потреби в парі



- до 30 т/год (без урахування роботи опріснювальних установок) [3]. Великі потреби в електроенергії для загальносуднових потреб, а також необхідність резервування потужності для забезпечення надійної та безпечної експлуатації судна призводять до значної надлишковості сумарної потужності установки щодо пропульсивної потужності.

Як впливає з наведених даних, сумарна потужність приводних двигунів єдиної електроенергетичної установки круїзного лайнера на 30 % (і більше) перевищує потужність гребних електродвигунів (рисунок 1).

Аналіз критеріїв вибору типу і складу суднової енергетичної установки круїзного лайнера дає змогу визначити їхню пріоритетність [4]. До пріоритетів першого рівня належать критерії забезпечення експлуатаційної працездатності ЕУ в умовах впливу зовнішніх і внутрішніх джерел (показники надійності та живучості) [5]. До пріоритетів другого рівня належать показники економічної ефективності ЕУ, екологічні та віброакустичні показники. Залежно від особливостей судна, що проектується, перевага може бути віддана тому чи іншому типу установки.

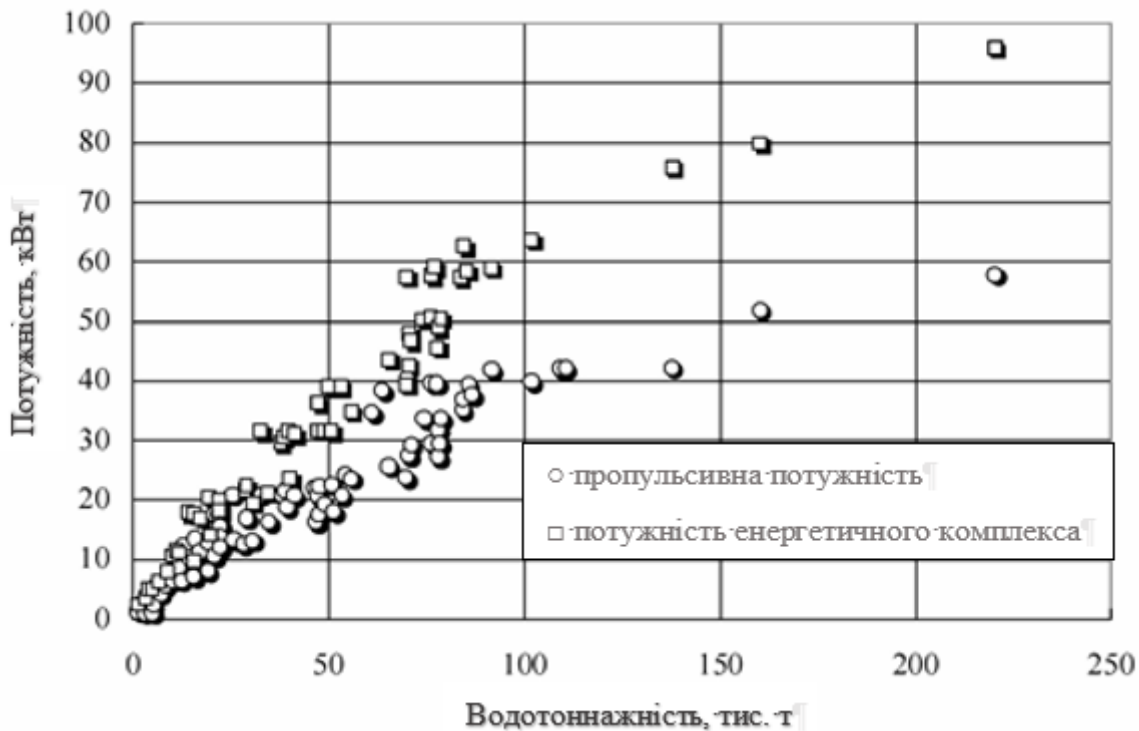


Рисунок 1. - Розподіл потужності енергетичних комплексів круїзних лайнерів

Актуальним є розгляд нових схемних рішень, стосовно ЕУ круїзних лайнерів.

Метою цієї роботи є аналіз умов застосування суднових газотурбінних установок зі спільною термодинамічною і термохімічною регенерацією тепла відхідних газів у складі енергетичних комплексів.

Виклад основного матеріалу.

На круїзних лайнерах сучасної побудови набули застосування такі типи енергетичних установок.



Дизель-електрична установка. До складу установки входить 4...8 дизель-генераторів (ДГ). Основні споживачі електроенергії - 2...4 гребних електродвигуни потужністю до 25 МВт, 3...6 підрулювальних пристроїв (1...3 МВт), загальносудові споживачі. Для вироблення теплової енергії використовуються допоміжні та утилізаційні парогенератори, що виробляють насичену пару тиском 0,7...0,9 МПа.

Аналіз показує, що в усьому діапазоні швидкостей експлуатації лайнера найкращі показники за питомою витратою палива у дизель-електричних установках, що працюють на важкому паливі. Такі установки мають найгірші масогабаритні показники (приміщення, в яких розміщено обладнання такої установки, можуть займати до 18 % загального обсягу судна) [6].

Комбінована дизель-газотурбоелектрична установка CODLAG (Combined Diesel-eLectric And Gas). До складу енергетичного комплексу входять 2...5 ДГ і 1-2 ГТГ. Установки можуть бути як із форсажними (бустерними) ГТГ, так і з маршовими (основними) ГТГ [7].

Доцільно застосовувати комбіновані установки CODLAG у разі, якщо швидкість переходу судна становить 23...25 вузла, а в інших режимах експлуатації швидкість становить 17...18 вузлів.

Для виконання вимог Конвенції МАРПОЛ 73/78 в установках із дизельними двигунами застосовують різні технології очищення газів, як-от EGR (рециркуляція випускних газів), FWE (застосування водопаливних емульсій), DWI (пряме впорскування води в камеру згоряння), HAM (зволоження наддувного повітря), SCR (застосування селективного каталітичного очищення). Це призводить до ускладнення циклу, подорожчання установки, збільшення габаритів, зменшення потенціалу утилізованих випускних газів.

Комбінована газопаротурбінна установка з електрорухом COGES (Combined Gas turbine and steam turbine integrated Electric drive System) [8]. Енергетичні комплекси такої схеми реалізовано на 8 круїзних лайнерах, вони складаються з двох ГТД з теплоутилізуючими контурами, утилізаційного паротурбогенератора і стоянкового ДГ.

Машинне відділення установки COGES займає близько 7 % загального обсягу, але така установка має найвищу питому витрату палива.

Схема COGEN передбачає застосування головних ГТГ для пропульсивного комплексу і вироблення електроенергії для загальносуднових потреб, теплоутилізаційних контурів ГТД для вироблення теплової енергії (у вигляді насиченої пари) на ходових режимах. До складу енергокомплексу входить стоянковий ДГ.

Застосування головних газотурбінних двигунів у складі установок CODLAG, COGES, COGEN дає змогу підвищити показники надійності та живучості енергетичної установки круїзного лайнера. ГТД забезпечує високу готовність до пуску і приймання навантаження (120...180 сек), можливість тривалої стійкої роботи двигуна на режимі 100 % навантаження, можливість агрегатної заміни головного двигуна. Емісія ГТУ за оксидами азоту становить зазвичай третину від викидів ДВЗ, а за СО не більше 15%. Водночас малі масогабарити ГТД дають змогу рівномірно розподіляти масу обладнання на



верхніх палубах і активно використовувати навантажувальне резервування, що передбачає використання надлишкових виробничих можливостей об'єктів щодо виконання функцій в умовах перевантажень у разі відмови інших об'єктів.

Найбільшого поширення набули ГТД LM 2500 і LM 2500+ фірми GE Marine. У зв'язку зі зростанням потужності ЕУ круїзних лайнерів ця фірма розробила модель LM2500+G4, потужністю 35 МВт. Українське підприємство НВКГ "Зоря"- "Машпроект" серійно випускає газотурбінні двигуни морського застосування (UGT) у діапазоні потужностей від 2,5 до 27 МВт. Типорозмірний ряд двигунів фірми Rolls-Royce містить у собі поряд з аналогічною за потужністю LM2500+G4 модель MT 30 і ГТД складного циклу (з проміжним охолодженням і регенерацією) WR 21. Іншим варіантом підвищення теплової ефективності є застосування циклу STIG (Steam Injection Gas turbine) з подачею пари безпосередньо в камеру згоряння ГТД (рисунок 2).

Для циклу STIG характерна повна втрата циклової води. У газопаротурбінних установках типу "Водолій", розроблення "Зоря"- "Машпроект", передбачено повернення води в цикл (при температурі охолоджувальної води вище за 20...22°C знадобиться додаткове підживлення циклу водою в обсязі 5...7 % від паропроодуктивності котла-утилізатора). Масагабарити установки "Водолій", порівняно з установкою простого циклу, значно зростають.

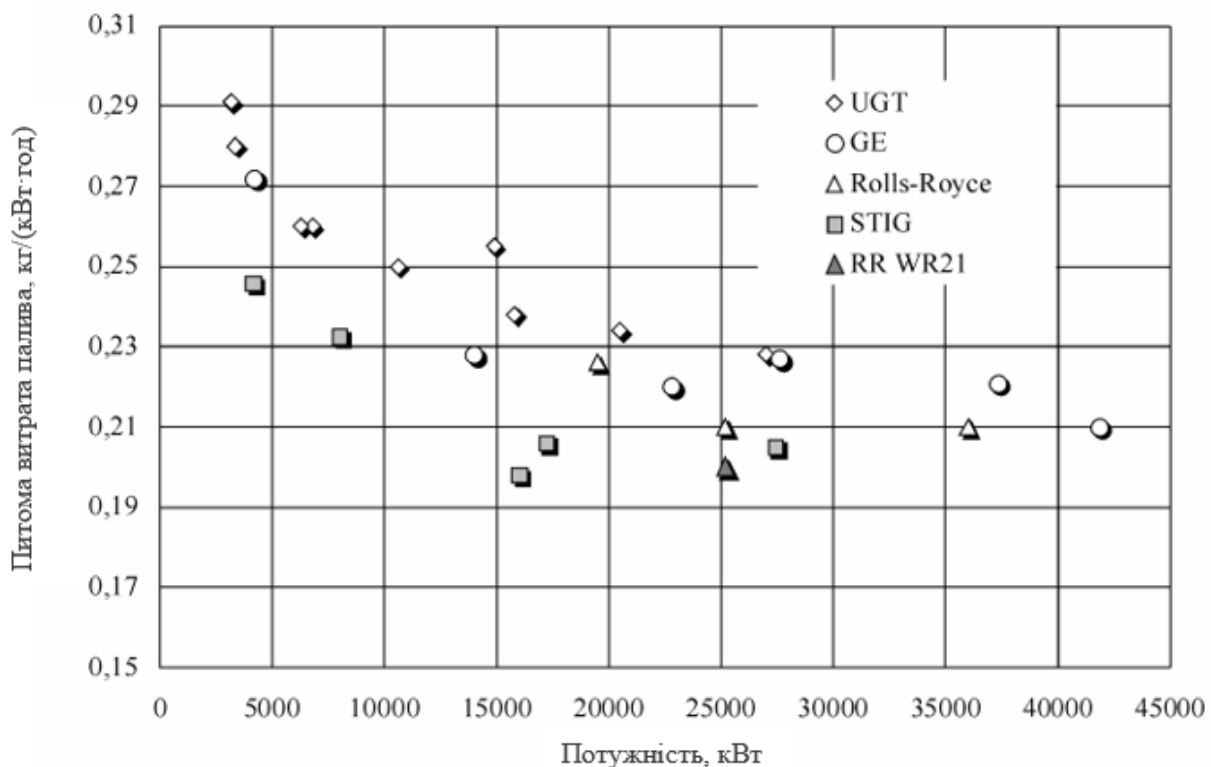


Рисунок 2 - Залежність питомої витрати палива від потужності для сучасних ГТД морського виконання

Застосування у складі установок CODLAG і COGEN газотурбінних двигунів складного циклу дає змогу досягти зменшення витрат палива на 15-20 %.



Одним зі шляхів підвищення ефективності теплових двигунів є термохімічна регенерація тепла, яка передбачає утилізацію тепла газів, що відходять від ГТД, у процесах конверсії палива в суміш газів з більш високою теплотворною здатністю [9]. Як паливо в таких установках можуть використовуватися як традиційні вуглеводневі, так і альтернативні палива (відходи термопластичних полімерів, етанол, метанол, диметилловий ефір та ін.).

У Національному університеті кораблебудування розроблено математичну модель газотурбінної установки з термохімічною регенерацією теплоти [10] (рисунок 3). Можливі два варіанти здійснення регенеративної схеми - встановлені послідовно за газотурбінним двигуном (ГТД) регенератор (Р) і термохімічний реактор (ТХР) та схема ГТД-ТХР-Р.

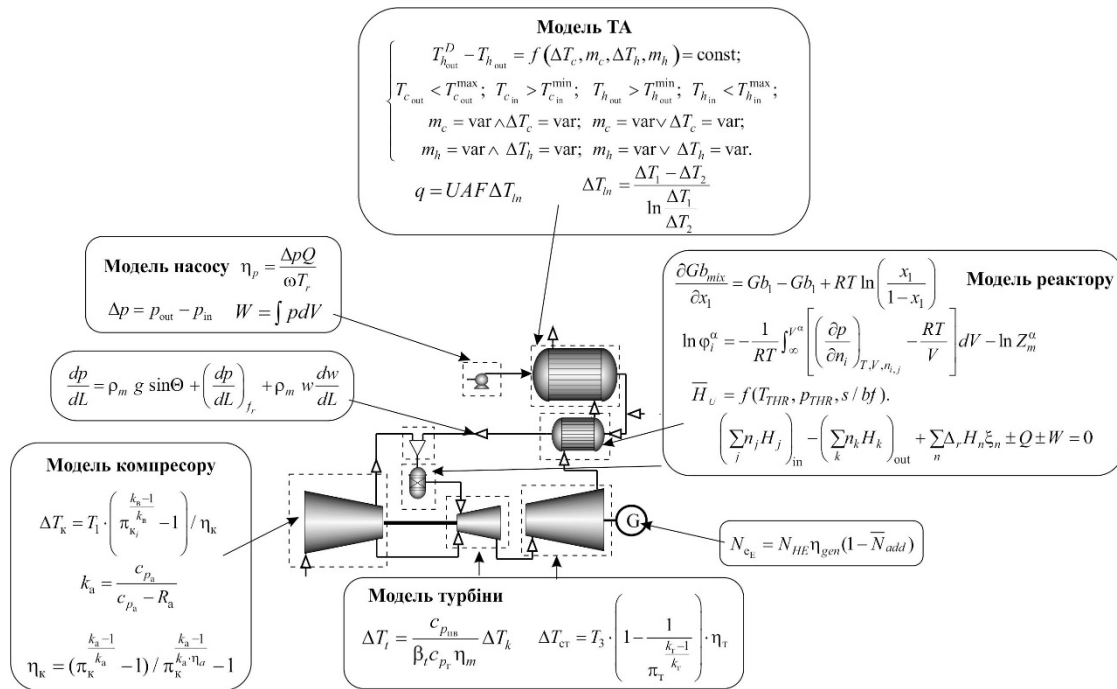


Рисунок 3 - Спрощена розрахункова схема газотурбінної установки з термохімічною конверсією палива

Для оцінки характеристик такої установки, поряд зі ступенем регенерації вводиться поняття коефіцієнта збільшення теплоти згоряння палива (1)

$$\bar{H}_U = \frac{H_U^K - H_U^B}{H_U^B}, \tag{1}$$

де H_U^B і H_U^K – нижчі наявні теплотворні здатності базового і конвертованого палива відповідно.

Аналіз ефективності ГТУ зі спільною термодинамічною і термохімічною регенерацією, виконаною за схемою ГТД-Р-ТХР стосовно базового ГТД потужністю 16 МВт вітчизняного виробництва (ступінь регенерації 0,85, коефіцієнт збільшення теплоти згоряння палива 0,2), показує, що питома витрата палива в такій установці може бути зменшена на 25 ... 30 % порівняно з ГТД складного циклу, з термодинамічною рекуперацією тепла. Але за температури за камерою згоряння $T_3 = 1300/1500$ К допустима температура реакції конверсії



палива не перевищить $T_p = 530/580$ К відповідно. Такі значення температур істотно обмежують вибір палива, яке може бути використане в розглянутій установці.

Для схеми ГТД-ТХР-Р допустима температура реакції конверсії палива істотно вища і становить близько 850 К за $T_3 = 1300$ К, збільшуючись до 980 ... 1000 К за $T_3 = 1500$ К. При цьому питома витрата палива для такої установки вища, ніж для схеми ГТД-Р-ТХР на 10...12 %.

Застосування спільної термодинамічної і термохімічної регенерації знижує можливості подальшої утилізації тепла газів, що відходять, порівняно з ГТД простого циклу.

ГТУ такого типу можуть використовуватися у складі енергетичних установок CODLAG і COGEN, застосування їх у складі установок COGES є проблематичним через низький потенціал відхідних газів T_4 (рисунок 4).

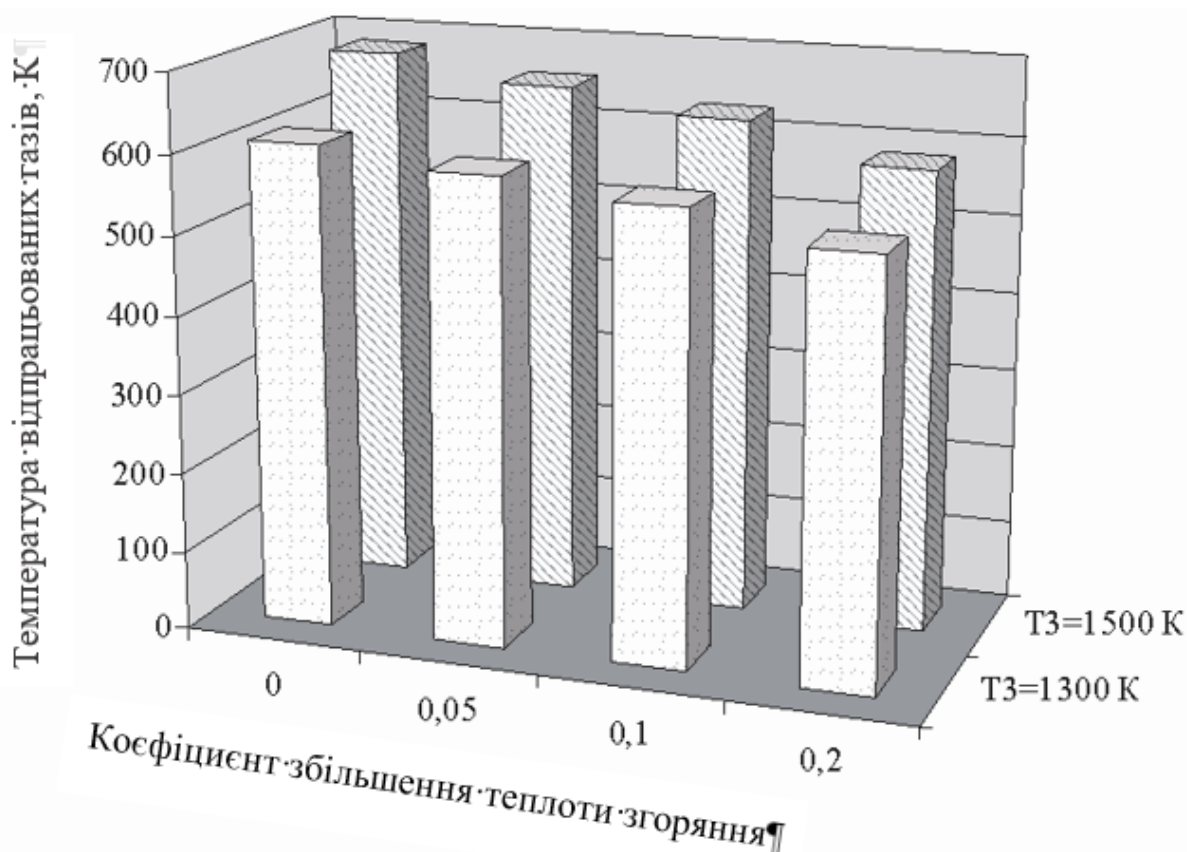


Рисунок 4 - Залежність коефіцієнта збільшення теплоти згоряння від температури відхідних газів ГТУ для схеми ГТД-Р-ТХ

Висновки.

Застосування у складі мобільних енергетичних комплексів газотурбінних установок зі спільною термодинамічною і термохімічною регенерацією тепла дає змогу суттєво (на 20-30%) знизити питому витрату палива.

Реалізація цього потенціалу вдосконалення енергетичних установок вимагає виявлення закономірностей процесів термохімічної регенерації тепла стосовно газотурбінних установок.



Література:

1. Bond, M.: ABB to power all three new Virgin Voyages cruise ships. Seatrade Cruise News, <https://www.seatrade-cruise.com/news-headlines/abb-power-all-three-new-virgin-voyages-cruise-ships>, last accessed 2023/07/14
2. Armellini, A., Daniotti, S., Pinamonti, S.: Gas Turbines for Power Generation on Board of Cruise Ships: A Possible Solution to Meet the New IMO Regulations? In: Cocchi, A., Andreini, P., Cassitto L. (eds.) 69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014, vol. 81, 540–547. Elsevier Ltd. (2015), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.127>
3. Cruise industry overview. The Florida-Caribbean Cruise Association, Florida (2018).
4. O. Cherednichenko, S. Serbin, M. Tkach and O. Savenko, "Multi-dimensional Classification of the Schemes of Marine Power Generating Units," 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005702
5. J. D. Schuddebeurs, C. D. Booth, G. M. Burt and J. R. McDonald, "Impact of Marine Power System Architectures on IFEP Vessel Availability and Survivability," 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Arlington, VA, USA, 2007, pp. 14-21, doi: 10.1109/ESTS.2007.372058.
6. Kenneth Jofs. Gas Turbine Technology for Advanced Cruise Ships / Kenneth Jofs // BUSINESS BRIEFING: GLOBAL CRUISE, 2004. – P. 35–38.
7. Combined diesel and gas turbine: the alternative power plant option/The future of ship design. Part 2. Published for Deltamarin Ltd by The Royal Institute of Naval Architects, June 2001 – p. 11–19
8. Celebrity Millennium, <https://www.ship-technology.com/projects/millennium/>, last accessed 2023/07/14
9. Cherednichenko, O., Mitienkova, V.: Analysis of the Impact of Thermochemical Recuperation of Waste Heat on the Energy Efficiency of Gas Carriers. J. Marine. Sci. Appl. (2020), <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00127-5>
10. Чередніченко О. К. Термохімічні технології для енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку та суден-газовозів : монографія / О. К. Чередніченко, С. І. Сербін. – Миколаїв : Видавець Торубара В.В. – 2020. – 132 с.

Abstract. In article is considered scheme for modern ship power gas turbine plants. The feasibility of applying to such ships gas turbines plants together with thermodynamic and thermochemical regeneration. Potential opportunities for reducing specific fuel consumption and the direction of further improvement of ship power plants are identified.

Key words: power complex, gas turbine plant, heat recovery, fuel conversion

Стаття відправлена: 29.07.2023 р.
© Коробейнікова Н.В.