

М. А. ПИРИСУНЬКО¹, Р. М. РАДЧЕНКО², А. А. АНДРЕЄВ¹, В. С. КОРНІЄНКО¹

¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсонська філія, Україна

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ УТИЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ГАЗІВ ЕЖЕКТОРНОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ МАШИНОЮ

Проблема забруднення повітряного басейну Світового океану шкідливими викидами з відпрацьованими газами судових дизелів пов'язана насамперед зі створенням високоефективних технологій по нейтралізації оксидів азоту NO_x на випуску із дизельного двигуна. Викиди шкідливих речовин при згорянні судових палив обмежуються відповідно до міжнародних програм захисту атмосфери і вимог Міжнародної морської організації ІМО (International Maritime Organization). Вимоги стосуються фактично всіх груп шкідливих викидів судових двигунів, а найсуворіші з них пов'язані в першу чергу з оксидами азоту NO_x та оксидами сірки SO_x . Для скорочення шкідливих викидів з відпрацьованими газами у навколишнє середовище вчені та світові лідери двигунобудування використовують і пропонують різноманітні методи зменшення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах. Виконання нових норм в напрямках подальшого вдосконалення робочого процесу, застосування альтернативних палив, присадок до палива і повітря, а також систем селективного каталітичного відновлення не виключає подальшого розвитку наукових досліджень в області очищення відпрацьованих газів. Одним з перспективних напрямів в екологізації судових двигунів внутрішнього згорання є нейтралізація шкідливих речовин у випускних газах, зокрема рециркуляцією газів. Однак, використання таких технологій вступає в протиріччя з енергетичною ефективністю двигуна. Запропоновано та проаналізовано схемно-конструктивне рішення системи рециркуляції випускних газів судового головного двигуна з використанням теплоти газів ежекторною холодильною машиною для охолодження повітря на вході. Ефект від використання теплоти рециркуляційних газів для охолодження повітря на вході двигуна проаналізовано з урахуванням змінних кліматичних умов для конкретної рейсової лінії судна. Застосування ежекторної холодильної машини дозволяє знизити температуру повітря на вході головного двигуна на 5...15°C, що забезпечує зменшення питомої витрати палива. При цьому скорочуються викиди шкідливих речовин при роботі двигуна з рециркуляцією газів.

Ключові слова: Екологізація; Холодильна машина; Відпрацьовані гази; Питома витрата палива; Двигун внутрішнього згорання; Шкідливі викиди; Рециркуляція.

Вступ

На сьогоднішній день найбільш актуальними є проблеми використання енергетичних ресурсів і запобігання забрудненню навколишнього середовища. Для вирішення цих проблем вкладається багато коштів в розвиток ресурсозберігаючих, енергозберігаючих і енергоефективних технологій, щоб звести до мінімуму екологічні наслідки використання органічного палива та інших природних ресурсів.

Енергетичні установки є однією з головних причин збільшення використання палива і викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. Велика доля при цьому належить двигунам внутрішнього згорання (ДВЗ), які займають провідне місце як джерела енергії (теплової, механічної, електричної) майже в усіх галузях. Саме через хімічне забру-

днення токсичними речовинами, що містяться у відхідних газах ДВЗ, наноситься найбільша шкода, а найбільш чутливий вплив на навколишнє середовище має місце від судових енергетичних установок, в яких головним джерелом енергії є ДВЗ.

Утворення таких шкідливих газів, як діоксид вуглецю CO_2 , оксидів азоту NO_x , монооксиду вуглецю CO , оксидів сірки SO_x та інш. залежить від організації робочих процесів в ДВЗ. Вельми ефективним шляхом екологізації судових ДВЗ є штучна нейтралізація шкідливих речовин у відхідних газах, наприклад, рециркуляція газів (EGR-технологія). Однак, використання таких технологій вступає в протиріччя із енергетичною ефективністю ДВЗ, адже заходи зі зменшення викидів вимагають додаткових зовнішніх витрат.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Рециркуляція відхідних газів за технологією EGR є методом, що значно зменшує формування NOx у судових дизельних двигунах. Його застосування повністю задовольняє вимогам Tier III стосовно NOx. За схемою EGR після охолодження і очищення частина відхідних газів рециркулюється до повітряного ресивера. Таким чином, частина кисню в повітрі, що використовується в процесі горіння, замінюється оксидом CO₂. Це, в свою чергу, зменшує вміст кисню O₂ і швидкість горіння, тим самим знижуючи його максимальну температуру, а відтак і інтенсивність утворення NOx [1-6].

Як показали дослідження [2], застосування рециркуляції з K_p = 10 % знижує NOx приблизно на 30 % без істотного зростання витрати палива, хоча димність відхідних газів дещо збільшується. При K_p = 20 % зменшення викиду оксидів азоту може сягати 60 %. Однак вже при K_p > 10...15 % спостерігається погіршення паливної економічності на 4...7 %.

Оскільки молекули CO₂ і води мають більш високу теплоємність, то дещо знижується температура згорання. Підвищення витрати газів дає близько 93 % ефекту зниження температури відхідних газів, тоді як збільшення питомої теплоємності – близько 7 % [4]. Охолодження рециркуляційних газів призводить до зменшення викидів NOx при порівнянних ступенях рециркуляції K_p. Цей ефект більш значущий при великих ступенях рециркуляції [1, 3, 6].

Перспективним на сьогоднішній день є використання технологій, які забезпечують підвищення паливно-енергетичної ефективності ДВЗ при роботі з системами рециркуляції газів, тобто поєднують високу екологічну ефективність з економічністю. До таких технологій можна віднести попереднє охолодження повітря (перед турбокомпресором) за допомогою тепловикористовуючих холодильних машин. Перевагою такого рішення є зменшення теплового навантаження на скруббер очищення рециркуляційних газів завдяки використанню їх теплоти.

Мета дослідження – оцінка ефективності попереднього охолодження повітря судового головного двигуна ежекторною холодильною машиною (EXM) з використанням теплоти рециркуляційних газів.

3. Методологія дослідження

При аналізі ефективності застосування запропонованого рішення порівняння здійснено на основі базової схеми з рециркуляцією відхідних газів, для малообертових двотактних дизельних двигунів фірми MAN відповідно до умов екологічності

Tier III [5]. Рециркуляція забезпечується байпасування частини відхідних газів з наступним очищенням від шкідливих газів в скруббері та доохолодженням в теплообміннику-охолоджувачі газу.

Схемне рішення із застосуванням тепловикористовуючого контуру EXM розглянуто для судового малообертового дизельного двотактного двигуна MAN B&W марки 6G70ME-C9.5. Для аналізу параметрів системи рециркуляції та характеристик двигуна використовувався програмний комплекс SEAS фірми-виробника MAN [6]. Розрахунок проведено для наступних експлуатаційних характеристик двигуна (при умовах ISO): навантаження на двигун NMCR = 90 %; потужність N_e = 19656 кВт; частота обертання n_e = 80,1 хв⁻¹; питома витрата умовного палива g_e = 169,8 г/(кВт·год). Система рециркуляції газів (EGR) зі скруббером і охолоджувачем газу відповідає умовам екологічності Tier III.

Розрахунок характеристик двигуна проводився на експлуатаційному режимі при рейсі суховантажного судна з Одеси до Амстердаму, що здійснювався з 09.07.2019 по 20.07.2019 р. Дані зміни кліматичних умов протягом рейсу (температура зовнішнього повітря t_{нв}, температура забортної води t_w, вологовміст зовнішнього повітря d_{нв} і відносна вологість φ_{нв} від доби рейсу судна (рис. 1).

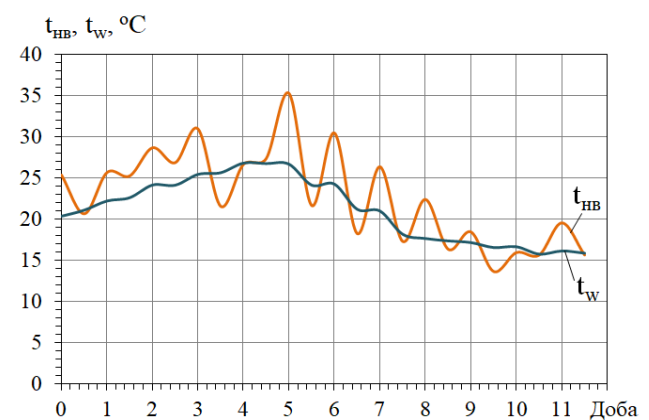


Рис. 1. Залежності температури зовнішнього повітря t_{нв} і забортної води t_w, вологовмісту зовнішнього повітря d_{нв} і відносної вологості φ_{нв} упродовж рейсу судна Одеса-Амстердам

Характеристики EXM: холодоагент – R142b; температури кипіння у випарнику-охолоджувачі повітря t₀ = 3...7 °C; кипіння в генераторі t_g = 100...120 °C; конденсації t_c = 30...35 °C.

4. Результати дослідження

Розроблена схема системи рециркуляції газів з EXM (рис. 2), відповідно до якої відхідні гази кількістю від 10 до 40 % подаються з ресивера відпра-

цьованих газів у скруббер, де вони частково охолоджуються і очищуються при розпиленні води форсунками. Потім газі охолоджуються в теплообміннику-охолоджувачі газу, конденсат відводиться конденсатовідводником, а очищений і охолоджений газ подається вентилятором у повітряний ресивер, де він змішується із повітрям від турбокомпресора.

Теплота рециркуляційних газів відводиться до генератора ЕХМ, розташованим перед скруббером. Холод, що виробляється ЕХМ, застосовується для охолодження повітря на вході в турбокомпресор.

Результати розрахунків системи утилізації теплоти рециркуляційних газів в ЕХМ з тепловими коефіцієнтами $\zeta = 0,30$ показують, що холодопродуктивність (рис. 3) становить $Q_{0(0,3)} = 430 \dots 450$ кВт ($\zeta = 0,30$). Теплове навантаження на генератор ЕХМ $Q_r = 1450 \dots 1520$ кВт при відповідному зниженні температури газу в генераторі (перед скруббером) від $t_{r1} = 360 \dots 410$ °С до $t_{r2} = 180$ °С прийнято з урахуванням запобігання небезпеці виникнення низькотемпературної сірчистоокислої корозії. Застосування ЕХМ забезпечує зниження температури повітря перед турбокомпресором на $\Delta t_{п(0,3)} = 5,1 \dots 8,0$ °С ($\zeta = 0,30$); $\Delta t_{п(0,35)} = 5,7 \dots 9,4$ °С ($\zeta = 0,35$).

Зниження температури повітря на вході забезпечує скорочення питомої витрати умовного палива $\Delta g_{e(0,3)} = 0,5 \dots 0,7$ г/(кВт год) ($\zeta = 0,30$).

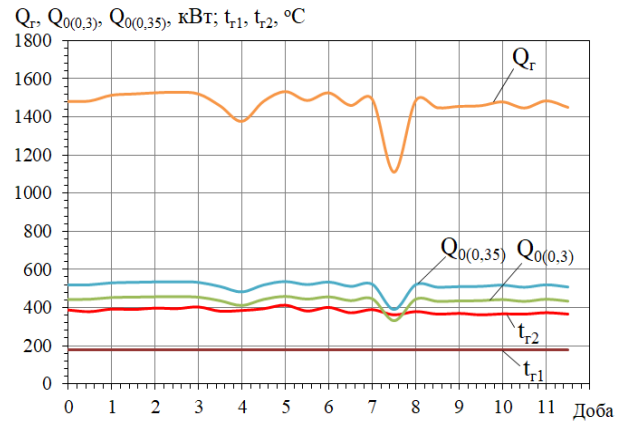


Рис. 3. Зміна температури відхідних газів на виході з колектору t_{r1} , на виході з генератора ЕХМ t_{r2} , теплового навантаження на генератор Q_r , холодопродуктивності ЕХМ при різних теплових коефіцієнтах $Q_{0(0,3)}$, $Q_{0(0,35)}$ упродовж рейсу судна

Висновки

Розроблено схемно-конструктивне рішення системи рециркуляції випускних газів суднового головного двигуна з використанням їх теплоти ежекторною холодильною машиною для охолодження повітря на вході. Ефект від використання теплоти рециркуляційних газів для охолодження повітря на вході проаналізовано для двигуна фірми MAN 6G70ME-C9.5 з урахуванням змінних кліматичних умов упродовж рейсу судна "Одеса-Амстердам".

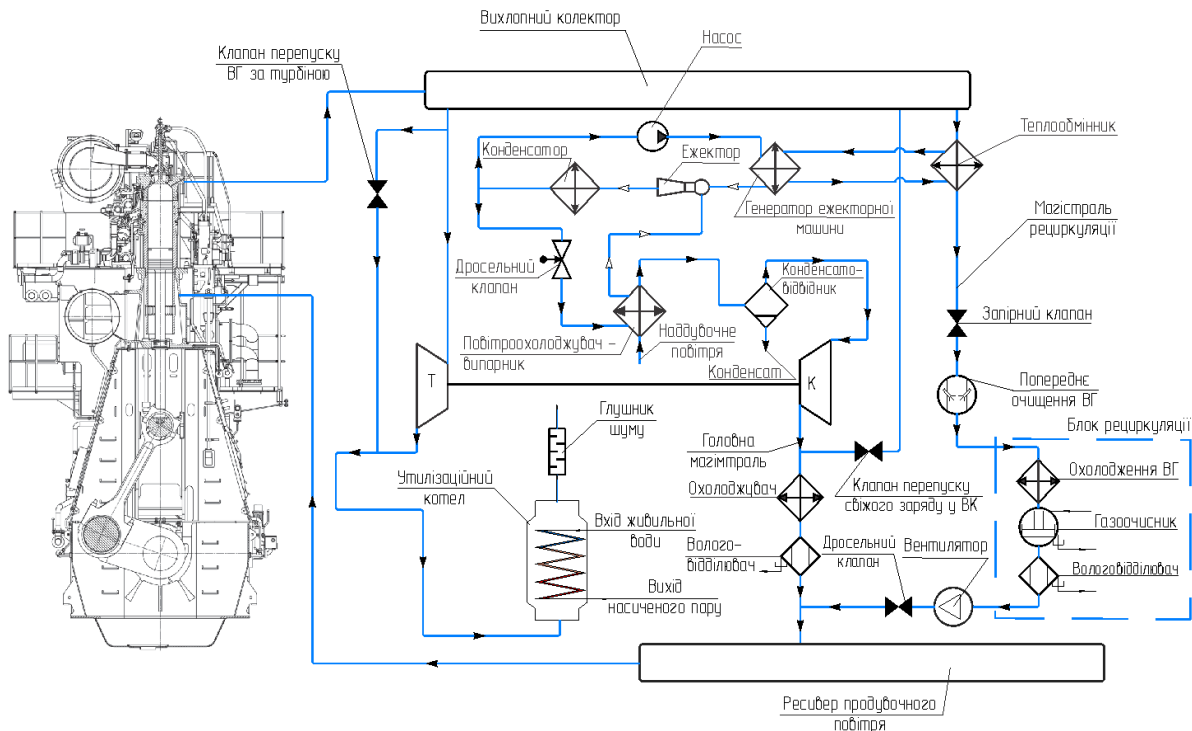


Рис. 2. Схема системи рециркуляції з байпасом малооборотного двигуна фірми MAN із тепловикористовуючою ЕХМ

Показано, що використання теплоти рециркуляційних газів ежекторною холодильною машиною дозволяє знизити температуру повітря на вході головного двигуна на 5...15°C, що забезпечує зменшення питомої витрати палива на 0,5...1,5 г/(кВт год). При цьому скорочуються викиди шкідливих речовин при роботі двигуна з рециркуляцією газів.

Література

1. *Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines [Text]* / A. K. Agrawal, S. K. Singh, S. Sinha, M. K. Shukla // *Academy Proceedings in Engineering Sciences*. – 2004. – vol. 3, iss. 29. – P. 275-284.
2. Ghosh, S. *The Effects of EGR on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Operated on Diesel Oil and Pongamia Pinata Methyl Ester (PPME)* [Електронний ресурс] / S. Ghosh, D. Dutta // *International Journal of Engineering Inventions*. – 2012. – vol. 1, Iss. 12. – P. 39-44. – Режим доступу: <http://www.ijejournal.com/papers/v1i12/E01123944.pdf>. – 12.05.2019.
3. *Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance and emission characteristics of a three cylinder direct injection compression ignition engine [Text]* / J. Hussain, K. Palaniradja, N. Alagumurthi, R. Manimaran // *Alexandria Engineering Journal*. – 2012. – vol. 4, Iss. 51. – P. 241-247.
4. Agarwal, D. *Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine [Text]* / D. Agarwal, S. K. Singh, A. K. Agarwal // *Applied Energy*. – 2011. – vol. 8, iss. 68. – P. 2900-2907.
5. *MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide* [Електронний ресурс] / MAN Energy Solutions. – Режим доступу: https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf. – 9.10.2018.

[es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf](https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf). – 9.10.2018.

6. *CEAS Engine Calculations* [Електронний ресурс] / MAN Energy Solutions. – Режим доступу: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>. – 12.05.2019.

References

1. Agrawal, A. K., Singh, S. K., Sinha, S., Shukla, M. K. *Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines. Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 2004, vol. 3, iss. 29, pp. 275-284.
2. Ghosh, S., Dutta, D. *The Effects of EGR on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Operated on Diesel Oil and Pongamia Pinata Methyl Ester (PPME). International Journal of Engineering Inventions*, 2012, vol. 1, iss. 12, pp. 39-44. Available at: <http://www.ijejournal.com/papers/v1i12/E01123944.pdf> (accessed 12.05.2019).
3. Hussain, J., Palaniradja, K., Alagumurthi, N., Manimaran, R. *Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance and emission characteristics of a three cylinder direct injection compression ignition engine. Alexandria Engineering Journal*, 2012, vol. 4, iss. 51, pp. 241-247.
4. Agarwal, D., Singh, S. K., Agarwal, A. K. *Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine. Applied Energy*, 2011, vol. 8, iss. 68, pp. 2900-2907.
5. *MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Emission Project Guide. MAN Energy Solutions*. Available at: https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/special_pg/7020-0145-09_uk.pdf (accessed 9.10.2018).
6. *CEAS Engine Calculations. MAN Energy Solutions*. Available at: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (accessed 12.05.2019).

Поступила в редакцію 14.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ГАЗОВ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

М. А. Пирисунько, Р. Н. Радченко, А. А. Андреев, В. С. Корниенко

Проблема загрязнения воздушного бассейна Мирового океана вредными выбросами с отработавшими газами судовых дизелей связана прежде всего с созданием высокоэффективных технологий по нейтрализации оксидов азота NO_x на выпуске из дизельного двигателя. Выбросы вредных веществ при сгорании судовых топлив ограничиваются в соответствии с международными программами защиты атмосферы и требований Международной морской организации ИМО (International Maritime Organization). Требования касаются практически всех групп вредных выбросов судовых двигателей, а более строгие из них связаны в первую очередь с оксидами азота NO_x и оксидами серы SO_x. Для сокращения вредных выбросов с отработавшими газами в окружающую среду ученые и мировые лидеры двигателестроения используют и предлагают различные методы уменьшения содержания вредных веществ в отработанных газах. Выполнение новых норм в направлениях дальнейшего совершенствования рабочего процесса, применения альтернативных топлив, присадок к топливу и воздуха, а также систем селективного каталитического восстановления не исключает дальнейшего развития научных исследований в области очистки отработанных газов. Одним из перспективных направлений в экологизации судовых двигателей внутреннего сгорания является нейтрализация вредных веществ в выпускных газах, в частности рециркуляцией газов. Однако, использование таких технологий

вступает в противоречие с энергетической эффективностью двигателя. Предложено и проанализировано схемно-конструктивное решение системы рециркуляции выпускных газов судового главного двигателя с использованием теплоты газов эжекторной холодильной машины для охлаждения воздуха на входе. Эффект от использования теплоты рециркуляционных газов для охлаждения воздуха на входе двигателя проанализированы с учетом переменных климатических условий для конкретной рейсовой линии судна. Применение эжекторной холодильной машины позволяет снизить температуру воздуха на входе главного двигателя на 5...15 °С, обеспечивает уменьшение удельного расхода топлива. При этом сокращаются выбросы вредных веществ при работе двигателя с рециркуляцией газов.

Ключевые слова: Экология; Холодильная машина; Удельный расход топлива; Двигатель внутреннего сгорания; Вредные выбросы; Рециркуляция.

DECREASING EMISSIONS FROM MARINE DIESEL BY UTILIZING RECIRCULATION GAS HEAT IN EJECTOR CHILLER

M. A. Prysunko, R. M. Radchenko, A. A. Andriev, V. S. Kornienko

The problem of air basin pollution of the World Ocean with harmful emissions from the exhaust gases of marine diesel engines is primarily associated with the creation of highly efficient technologies for the neutralization of nitrogen oxides NO_x on exhaust gases from a diesel engine. Emissions of harmful substances from the combustion of marine fuels are limited by international atmospheric protection programs and the requirements of the International Maritime Organization (IMO). The requirements relate to almost all groups of harmful emissions in marine engines and the more stringent of them are primarily related to nitrogen oxides NO_x and sulfur oxides SO_x. To reduce harmful emissions from exhaust gases into the environment, scientists and world engine leaders use and suggest various methods for reducing the content of harmful substances in exhaust gases. The implementation of new standards in the areas of further improvement of the working process, the use of alternative fuels, fuel, and air additives, as well as selective catalytic reduction systems do not preclude further development of scientific research in the field of exhaust gas cleaning. One of the promising ways in environmentalizing marine internal combustion engines is the neutralization of harmful substances in exhaust gases through particular gas recirculation (EGR-technology). However, the use of such techniques conflicts with the engine's energy efficiency. In the work presented, the scheme-design solution of the exhaust gas recirculation system with using the heat of recirculation gases by an ejector refrigeration machine for cooling the air at the intake of ship's main engine is proposed. The effect of using the heat of recirculation gases for cooling the air at the intake of the engine is analyzed taking into account the changing climatic conditions for a particular vessel's route line. It is shown that the use of an ejector refrigeration machine reduces the air temperature at the entrance of the main engine by 5...15 °C, which reduces the specific fuel consumption. This reduces emissions of harmful substances when the engine is running with recirculation of gases.

Keywords: Ecology; Refrigerating machine; Specific fuel consumption; Internal combustion engine; Harmful emissions; Recirculation.

Пирисунько Максим Андрійович – викладач Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Андрєєв Андрій Адольфович – канд. техн. наук, доц. Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Корнієнко Вікторія Сергіївна – канд. техн. наук, викладач Херсонської філії Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Prysunko Maksym Andriyovych – lecturer of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: maximka1786@gmail.com.

Radchenko Roman Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8099-7327

Andreev Andreii Adolfofych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: andreev.cme@gmail.com.

Kornienko Victoria Sergiivna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: kornienkovika1987@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-3524-2045.