

Р. М. РАДЧЕНКО¹, М. А. ПИРИСУНЬКО²¹ Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсонська філія, Україна

ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Вирішення проблеми забруднення повітряного басейну Світового океану шкідливими викидами з відпрацьованими газами суднових дизелів пов'язано зі створенням високоефективних технологій по нейтралізації оксидів азоту NO_x на випуску із дизельної установки, що відноситься як до суден, що знаходяться в експлуатації, так і до тих, що проектується та будуються. Повітря, що надходить у двигун, є робочим тілом, яке здійснює певний термодинамічний цикл, в результаті чого змінюється його хімічний склад, а відпрацьована газова суміш містить безліч компонентів. Викиди шкідливих речовин при згорянні суднових палив обмежуються відповідно до міжнародних програм захисту атмосфери і вимог Міжнародної морської організації ІМО (International Maritime Organization). Вимоги стосуються фактично всіх груп шкідливих викидів суднових 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, такі як MAN Energy Solutions та Wärtsilä, використовують і пропонують різноманітні методи зменшення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах. Серед найбільш перспективних методів слід відзначити рециркуляцію відпрацьованих газів суднових дизелів. До її переваг над іншими методами відноситься несуттєвий вплив на показники роботи двигунів. При рециркуляції відпрацьованих газів знижується температура в камері згорання, що призводить до зменшення кількості оксидів азоту NO_x . Це зумовлене високими значеннями теплосмості двоокису вуглецю та водяної пари. Оскільки швидкість горіння знижується, температура вихлопу та теплове навантаження на деталі двигуна збільшуються. Розбавлення наддувного повітря відхідними газами знижує вміст кисню в повітрі з 21 до 13%. Тому можливості технології системи рециркуляції відпрацьованих газів суднового двигуна визначаються величиною співвідношення O_2/CO_2 у впускному повітрі, через що кількість продуктів згорання на впуску при рециркуляції обмежується величиною не більше 30%.

Ключові слова: оксиди азоту; відпрацьовані гази; наддувне повітря; рециркуляція; судновий дизель.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Основним судновим джерелом забруднення навколишнього середовища є головні і допоміжні двигуни енергетичних установок. В якості головних суднових двигунів домінують дизельні. Морська транспортна індустрія стикається з підвищеними вимогами по скороченню шкідливих викидів дизельними двигунами.

Відпрацьовані гази (ВГ) дизелів являють собою складну газову суміш, яка містить більше 200 компонентів [1]. Чотири компонента азот (N_2), кисень (O_2), діоксид вуглецю (CO_2) і вода (H_2O) становлять 99-99,9% обсягу ВГ. З точки зору екології вони не представляють інтересу, оскільки нетоксичні. Решта 0,1-1% обсягу ВГ - компоненти, які представляють екологічну небезпеку. Їх небезпеку

прийнято оцінювати двома характеристиками: токсичністю і димністю. Під токсичністю ВГ розуміють газоподібні компоненти, які мають шкідливий вплив на навколишнє середовище, живу природу і людину. Серед безлічі токсичних компонентів приблизно 80-95% припадає на частку п'яти з них (табл. 1) [2]. Ступінь їх шкідливості різна і в відносному вигляді може бути виражена співвідношенням:

$$CO : CH_x : SO_x : NO_x : RCHO = 1 : 2 : 16 : 40 : 40.$$

У переліку основних токсичних компонентів безперечно лідирують оксиди азоту. В ВГ дизелів міститься близько 10 сполук азоту з киснем, але домінантою є NO , його частка становить 95-98% від усіх оксидів. Решта 2-5% - вищі оксиди азоту: NO_2 ; N_2O ; N_2O_3 [3].

Таблиця 1

Склад токсичних компонентів відхідних газів

Компонент ВГ	Концентрація, г/м ³	Питомий викид, г/(кВт·годину)	Гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони, мг/м ³
Оксиди азоту NO _x	1,5-8	8-30	2
Оксиди вуглецю CO	0,25-2,5	0,5-6,0	20
Вуглеводень CH _x	0,25-2,0	0,25-2,5	-
Оксиди сірки SO _x	0,1-0,5	0,4-1,5	4
Альдегіди RCHO	0,001-0,04	0,05-0,2	0,2
Сажа, С	0,05-0,5	0,25-0,5	4

Вирішення проблеми забруднення повітряного басейну Світового океану викидами шкідливих речовин, в тому числі оксидами азоту NO_x з ВГ судових дизелів пов'язано, перш за все, зі створенням високоефективних технологій зниження концентрації NO_x на випуску з дизельної установки, і це повною мірою відноситься як до суден, які проектується і будуються, так і до суден, що знаходяться в експлуатації.

Мета дослідження – оцінка зменшення викидів оксидів азоту за різних схемних рішень системи рециркуляції відпрацьованих газів (РВГ) судових дизелів.

2. Результати дослідження

Законодавчим органом для нормування екологічних показників судових ДВЗ є Міжнародна Морська Організація (ІМО). Розроблені нею і діючі з 1 січня 2011 р технічні норми ІМО Tier II стосуються тільки викидів оксидів азоту. З 2016 року введено новий стандарт ІМО Tier III, в якому гранично допустимий вміст NO_x у відпрацьованих газах знижено майже в 4 рази [2]. Таке різке посилення нормативів на викиди забруднюючих атмосферу речовин змушує виробників двигунів постійно вишукувати все нові і нові технічні рішення, які покращують екологічні показники дизелів. На даний час склалася ситуація, коли розвиток сучасних ДВЗ і їх конкурентоспроможність визначаються головним чином наявністю засобів, що дозволяють знизити викиди шкідливих речовин до рівня відповідних екологічних вимог.

Сучасні вимоги щодо обмеження викидів NO_x і SO_x регулюються положенням VI Конвенції МАР-ПОЛ, прийнятої Міжнародною морською організацією (ІМО). Вони стосуються спеціальних районів контролю за викидами (Emission Control Area – ECA), та спеціальних районів контролю за викидами сірки (Sulfur Emission Control Area - SECA),

в яких норми викидів значно знижені (NO_x до 3,4 г/(кВт·годину), SO_x до нуля), а кількість таких районів зростає з кожним роком.

В зонах контролю за викидами можуть обмежуватись викиди SO_x або NO_x, або всіх трьох видів викидів із суден.

До існуючих зон контролю викидів входять:

- Балтійське море (SO_x, прийнято: 1997 / вступив в силу 2005 р.);
- Північне море (SO_x, 2005/2006);
- Балтійське море та Північне море SECAs (Sulfur Emission Control Area) - рівень SO_x у паливі встановлений 0,1% з 1 січня 2015 року);
- Північноамериканська зона, включаючи більшість побережжя США та Канади (NO_x та SO_x, 2016/2012)
- Американський Карибський басейн, включаючи Пуерто-Ріко та Американські Віргінські острови (NO_x та SO_x, 2011/2014).

Методи зниження викидів оксидів азоту і частинок прийнято розділяти на внутрішні (первинні) і зовнішні (вторинні).

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 багатоотворних розпилювачів форсунок;
- підвищення тиску упорскування палива;
- множинне впорскування палива;
- оптимізація конструкції камери згоряння;
- оптимізація подачі повітря.

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

- очищення ВГ від шкідливих компонентів поза двигуном за допомогою спеціальних пристроїв і фільтрів;

- 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.

Світовий прогрес та екологічні проблеми потребують більш нових, екологічних та економічних рішень. Ми розглянемо як спосіб покращення екологічних показників суднових ДВЗ систему рециркуляції відпрацьованих газів, основний принцип роботи якої зображено на рис. 1.

Рециркуляція ВГ (від. англ. Exhaust Gas Recirculation (EGR)) - це спосіб значно зменшити утворення NO_x в суднових дизельних двигунах.

Використовуючи цей метод, з'являється можливість виконання вимог Tier III.

В системі рециркуляції, після процесу охолодження і очищення, частина ВГ повертається в ресивер свіжого заряду. Таким чином, частина кисню в свіжому заряді замінюється CO_2 , що міститься у вихідних газах після процесу згоряння. Ця заміна зменшує вміст O_2 і збільшує теплоємність свіжого заряду, тим самим знижуючи температурний пік згоряння і утворення NO_x .

Для систем рециркуляції використовуються дві різні схеми [4, 5]:

1. Система з байпасом, сконфігурованим тільки з одним турбонагнітачем, що використовується для двигунів з діаметром циліндра до 700 мм;

2. Система (T/C cut-out) сконфігурована з двома або більше турбонагнітачами і використовується для двигунів діаметром циліндра понад 800 мм.

Кількість газів, що перепускаються на свіжий заряд, характеризується ступенем рециркуляції,

який виражається відношенням:

$$k_R = (M_R / (M_R + M_B)) 100 \%,$$

де M_R , M_B - маса перепускаемого газу і повітря в циліндрі двигуна.

На рис. 2 зображено принципову схему системи РВГ. Відповідно до якої відпрацьовані гази, що прокачуються високонапірним газотурбонагнітачем, потрапляють до високонапірного ресивера продувочного повітря через водяний скруббер. Який в свою чергу гази охолоджує, при цьому видаляючи Sox і тверді частинки за рахунок промивання, після чого вони потрапляють до камери згоряння.

Останні досліді фірми «MAN B&W» вказують що при всіх навантаженнях двигуна викиди NO_x зменшилися на 80 % і більше (рис. 3), що підтверджує відповідність вимогам Tier III [6].

У тестах двигуна було оптимізовано параметри двигуна - проміжок впорскування палива, проміжок відкриття випускного клапана та інше - з системою електронного управління фірми «MAN B&W».

Після приблизно 150 годин тестування EGR, камеру згоряння ретельно перевіряли. Стан був без аномального зносу або інших проблем у кільцях або вкладишах.

Висновки

Проаналізовано зменшення шкідливих викидів, передусім оксидів азоту, за різних схем системи рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів. За рахунок зниження концентрації кисню та збільшення теплоємності газів знижується температура

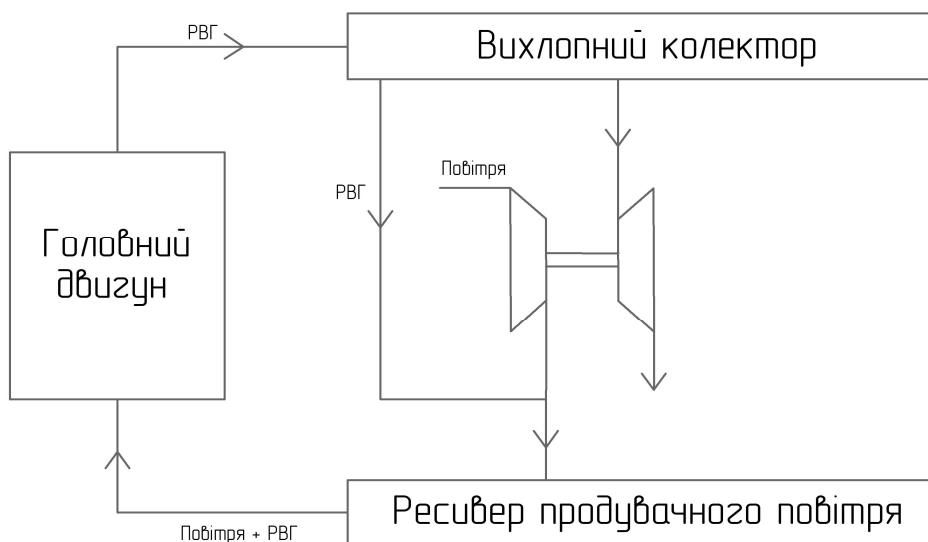


Рис. 1. Основний принцип рециркуляції відпрацьованих газів

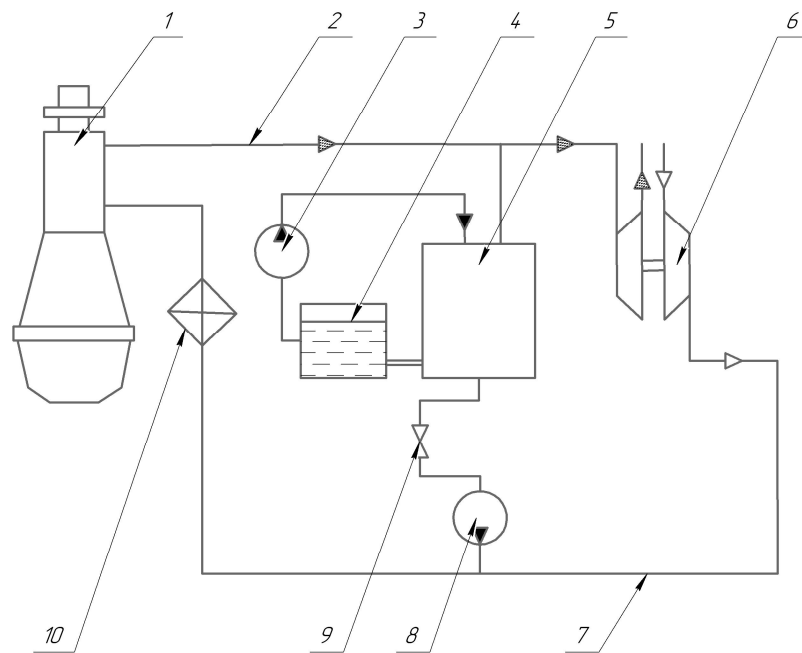


Рис. 2. Принципова схема рециркуляції відпрацьованих газів: 1 – судновий ДВЗ, 2 – газовий трубопровід, 3, 8 – насос, 4 – цистерна з водою, 5 – водяний скруббер, 6 – газотурбонагнітач, 7 – повітряний трубопровід, 9 – керуючий клапан, 10 – охолоджувач наддувочного повітря

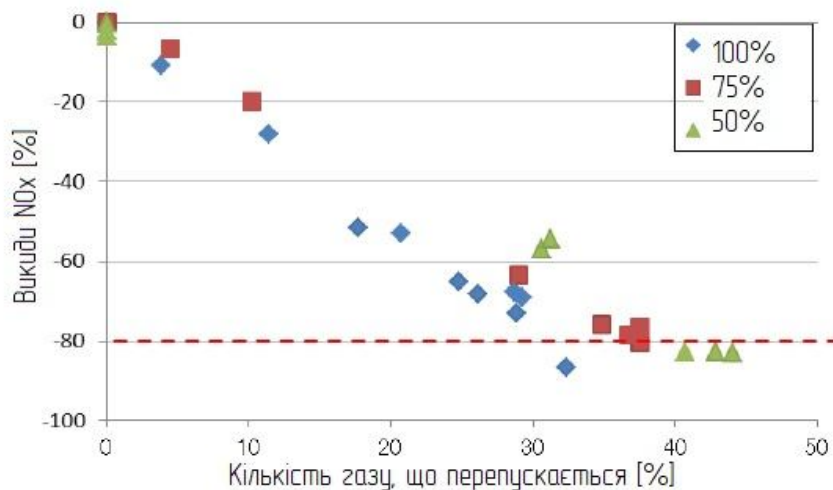


Рис. 3. Залежність зміни викидів NOx від кількості рециркулюючих газів

згоряння, що призводить до скорочення шкідливих викидів, при цьому без суттєвого впливу на енергетичні показники двигуна.

Література

1. Марков, В. А. Токсичность отработавших газов дизелей [Текст] / В. А. Марков, Р. М. Баширов, И. И. Габито. – Уфа : Изд-во Башкирского государственного аграрного университета, 2002. – 376 с.

2. Tier III Two-Stroke Technology [Electronic resource]. – MAN Diesel & Turbo, 2014. – 36 p. – Access mode: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/>

librariesprovider6/technical-papers/tier-iii-two-stroke-technology.pdf?sfvrsn=18. – 10.09.2018.

3. Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke marine engines [Electronic resource]. – MAN Diesel & Turbo, 2013. – 57 p. – Access mode: <https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK330/EMISSIONS/Emission%20Project%20Guide.pdf>. – 10.09.2018.

4. MAN B&W G35ME-B9.3-TII Project Guide. Electronically Controlled Two-stroke Engines with Camshaft Controlled Exhaust Valves [Electronic resource]. – 0.5 Edition, May 2014. – 341 p. – Access mode: https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S35ME-B9_3.pdf. – 10.09.2018.

5. *Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engine [Electronic resource]. – Copenhagen, Denmark : MAN Diesel & Turbo. – 36 p. – Access mode: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/exhaust-gas-emission-control-today-and-tomorrow.pdf?sfvrsn=22>. – 10.09.2018.*

6. *Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines [Electronic resource] // Environmental Project. – 2014. – no. 1510. – 114 p. – Access mode: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2014/03/978-87-93026-57-5.pdf>. – 10.09.2018.*

References

1. Markov, V. A., Bashirov, R. M., Gabito, I. I. *Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej* [Of exhaust gases of diesel engines]. Ufa, Publishing house of the Bashkir State Agrarian University, 2002. 376 p.

2. *Tier III Two-Stroke Technology*. MAN Diesel & Turbo, 2014. 36 p. Available at: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical->

[papers/tier-iii-two-stroke-technology.pdf?sfvrsn=18](https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/tier-iii-two-stroke-technology.pdf?sfvrsn=18) (accessed 10.09.2018).

3. *Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke marine engines*. MAN Diesel & Turbo, 2013. 57 p. Available at: <https://maredu.gunet.gr/modules/document/file.php/MAK330/EMISSIONS/Emission%20Project%20Guide.pdf> (accessed 10.09.2018).

4. *MAN B&W G35ME-B9.3-III Project Guide. Electronically Controlled Two-stroke Engines with Camshaft Controlled Exhaust Valves*. 0.5 Edition, May 2014. 341 p. Available at: https://marine.mandieselturbo.com/applications/projectguides/2stroke/content/printe/d/S35ME-B9_3.pdf (accessed 10.09.2018).

5. *Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engine*, Copenhagen, Denmark, MAN Diesel & Turbo. 36 p. Available at: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/exhaust-gas-emission-control-today-and-tomorrow.pdf?sfvrsn=22> (accessed 10.09.2018).

6. *Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines*. Environmental Project, 2014, no. 1510. 114 p. Available at: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2014/03/978-87-93026-57-5.pdf> (accessed 10.09.2018).

Поступила в редакцию 12.09.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

УМЕНЬШЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Р. Н. Радченко, М. А. Пирисунько

Решение проблемы загрязнения воздушного бассейна Мирового океана вредными выбросами с отработавшими газами судовых дизелей связано с созданием высокоэффективных технологий по нейтрализации оксидов азота NO_x на выпуске с дизельной установки, что относится как к судам, которые находятся в эксплуатации, так и к тем, которые проектируются и строятся. Воздух, поступающий в двигатель, есть рабочим телом, которое делает определенный термодинамический цикл, вследствие чего изменяется его химический состав, а отработанная газовая смесь имеет множество компонентов. 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, жесткие из них связаны в первую очередь с оксидами азота NO_x и оксидами серы SO_x. Для уменьшения количества вредных веществ с отработанными газами в окружающую среду ученые и мировые лидеры двигателестроения, такие как MAN Energy Solutions и Wärtsilä, используют и предлагают различные методы уменьшения содержания вредных веществ в отработавших газах. Среди наиболее перспективных методов следует отметить систему рециркуляции отработавших газов судовых дизелей. К ее преимуществам перед другими методами следует отнести несущественное влияние на показатели работы двигателей. При рециркуляции отработавших газов уменьшается температура пламени в камере сгорания, что приводит к уменьшению количества NO_x. Это обусловлено высокими значениями теплоемкости двуокиси углерода и водяного пара. Поскольку скорость горения снижается, температура выхлопа и тепловая нагрузка на детали двигателя увеличиваются. Разбавления наддувочного воздуха уходящими газами снижает содержание кислорода в воздухе с 21 до 13%. Поэтому возможности технологии системы рециркуляции отработавших газов судового двигателя определяются величиной соотношения O₂/CO₂ во впускном воздухе, из-за чего ограничивается количество продуктов сгорания на впуске величиной не более 30 %.

Ключевые слова: оксиды азота; отработавшие газы; наддувочный воздух; рециркуляция; судовой дизель.

**DECREASING EMISSIONS OF NITROGEN OXIDES WITH EXHAUST GASES
OF MARINE DIESEL ENGINES*****R. N. Radchenko, M. A. Pyrysunko***

Solving the problem of ocean's airspace polluting with harmful emissions of ship-generated diesel engines by exhaust gases is associated with the creation of highly effective technologies for the neutralization of nitrogen oxides NO_x from the diesel plant that apply both to vessels in service, designed and built. The air entering the engine is a working fluid that carries out a certain thermodynamic cycle, resulting in a change in its chemical composition, and the exhaust gas mixture contains many components. Emissions of harmful substances during the combustion of marine fuels are limited in accordance with international programs for the protection of the atmosphere and requirements of the International Maritime Organization IMO. Requirements apply all groups of harmful emissions of marine engines. The most stringent of them concern nitrogen oxides NO_x and sulfur oxides SO_x. To reduce harmful emissions from the exhaust gases into the environment, scientists and world leaders in engine construction, such as MAN Energy Solutions and Wärtsilä, apply and offer a variety of techniques to reduce the number of harmful substances in the exhaust gases. One of the most promising is the exhaust gas recirculation system (EGRS) of the ship diesel engine. Its advantage over other methods is the insignificant impact on the operation of the engine. During the exhaust gas recycling a temperature of the flame in the combustion chamber decreases, which leads to the reduction of NO_x number. This is a consequence of the high rates of carbon dioxide and water vapor. Since the combustion rate is reduced, the exhaust temperature and the thermal load on the engine part are increased. The dilution of the inflow air with waste gas reduces the oxygen content in the supercharged air from 21 to 13%. The possibilities of the technology of the system of recirculation of exhaust gases of a marine engine are limited by the value of the ratio of O₂/CO₂ in the intake air, due to which the amount of combustion products at the inlet is limited to no more than 30%.

Keywords: nitrogen oxides; exhaust gas; aircharge; recirculation; diesel engine.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц. Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

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

Radchenko Roman Nikolaevich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Pyrysunko Maksim – lecturer of Kherson filial of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: