

УДК 621.437:621.643:546.221.1

doi: 10.32620/aktt.2019.8.01

М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, О. С. МИТРОФАНОВ,
А. Ю. ПРОСКУРІН, Ю. М. ГАЛИНКІН

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв

ПОКАЗНИКИ СІРКОВОДНЕВОЇ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЇ РОЗШИРЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ У СКЛАДІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ

У статті розглянуто ефективність використання роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 в якості розширювальної машини перспективної енерготехнологічної установки видобування сірководню з глибин Чорного моря. В цій установці сірководень високого тиску використовується у розширювальній машині для отримання механічної енергії, якою можна забезпечити роботу насосів та іншого обладнання. 12РПД-4,4/1,75 представляє собою 12 циліндровий короткоходовий двигун з відношення $S/D = 0,4$. Особливістю двигуна є те, що для розподілу робочого тіла використовуються впускні та впускні отвори, перекриття яких здійснюється центральним ротором. Таким чином центральний ротор виконує функцію золотника та корпусу, в якому рухаються поршині. Застосування золотникового розподілу забезпечує просту та компактну конструкцію. Значення тиску сірководню на вході в роторно-поршкову розширювальну машину визначено в діапазоні глибин занурення трубопроводу $0...1000$ м, при температурі 280 К... 285 К та газовмісті сірководню в морській воді $0,0...10,0$ м³/м³. Визначення основних параметрів робочого тіла та робочого процесу виконано для добового видобудку морської води 100 м³/доб. Розраховано, що для газовмісту $2,5$ м³/м³ при глибини занурення підйомного трубопроводу $H = 250...1000$ м потужність розширювальної машини становить $0,20...0,61$ кВт, для газовмісту 5 м³/м³ – $0,65...0,86$ кВт, для газовмісту $7,5$ м³/м³ – $1,20...1,87$ кВт, для газовмісту 10 м³/м³ – $1,65...2,55$ кВт. Отримано індикаторні діаграми роботи розширювальної машини в залежності від газовмісту сірководню у морській воді та глибини занурення трубопроводу. Визначено, що з підвищенням тиску на вході ефективний ККД сірководневої розширювальної машини лежить у межах $0,21...0,49$. Також з підвищенням тиску на вході зменшується питома ефективна витрата із $51,5$ до $25,17$ кг/кВт•год. Низькі значення питомої ефективної витрати сірководню й високі значення ефективного ККД обумовлені конструктивними особливостями роторно-поршневої розширювальної машини, які поєднують переваги поршневих та роторних двигунів.

Ключові слова: сірководень; газовміст; розширювальна машина; роторно-поршковий двигун; індикаторна діаграма, ККД.

Вступ

Одним з важливих джерел відновлюваної енергії для умов України є сірководневий шар Чорного моря природного та антропогенного походження, що розташовано на глибинах більше 150 м [1], а в низці районів він починається вже з 25 м. Запаси покладів сірководню Чорного моря оцінено в $40...50$ млрд т. зі щорічним поповненням у $10^7...10^8$ млн т. [2], що дозволяє отримувати потужність еквівалентну 10% потужності атомних електричних станцій України.

На даний час відома велика кількість різноманітних технологій видобутку сірководню з морської води. Вони мають різний ступінь апробації та більшість з них не мають технічної реалізації [3, 4].

Одним з перспективних способів видобування сірководню з Чорного моря є енерготехнологічна установка, яка забезпечує піднімання газорідної суміші газліфтним методом з використанням для

виділення сірководню в газоподібному стані хвильових імпульсів (заявка на корисну модель № і 2019 05063). Виділення сірководню з морської води реалізується в коалесційному сепараторі. Морська вода зі зменшеною концентрацією сірководню не поступає в підйомний трубопровід, а розподіляється колекторами в просторі морських глибин. Внаслідок суттєвої різниці густини морської води та густини газорідної суміші у вхідному перерізі підйомного трубопроводу суміш сірководню та морської води у вихідному перерізі має значний надлишковий тиск та поступає до сепаратора сірководню високого тиску. Після сепаратора доцільно використати сірководень високого тиску у розширювальній машині для отримання механічної енергії, якою можна забезпечити роботу насосів живлення та іншого обладнання. Основні вимоги, яким повинні задовольняти сірководневі розширювальні машини є: низькі масогабаритні показники, можливість зворотного ходу, стійкість до зовнішнього механічного впливу та віб-

рації, простота конструкції та висока надійність та ремонтпридатність. Тому вибір типу та конструкції розширювальної машини для роботи з сірководнем високого тиску є вельми актуальним.

1. Постановка задачі

Одним з можливих варіантів сірководневої розширювальної машини, який задовільнить всім необхідним вимогам є роторно-поршневий двигун 12РПД-4,4/1,75 (заявка на винахід № а 2019 02189). У конструкції 12РПД-4,4/1,75 для розподілу робочого тіла використовуються впускні та випускні отвори, перекриття яких здійснюється центральним ротором, який виконує функцію золотника та корпусу в якому рухаються поршні. Застосування золотникового розподілу забезпечує досить просту та компактну конструкцію. Також завдяки наявності у конструкції центрального кулачкового вала є можливість регулювати фази газорозподілу та режими роботи двигуна за рахунок ступеня наповнення циліндра.

Мета даної роботи полягає в оцінці ефективності використання роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 в якості сірководневої розширювальної машини енерготехнологічної установки; визначенні параметрів робочого тіла та робочого процесу, що забезпечать прийнятні питому витрату й потужність при заданих умовах експлуатації.

2. Виклад основного матеріалу

На рис.1 представлено загальний вигляд пропонуваної сірководневої роторно-поршневої розширювальної машини на базі 12РПД-4,4/1,75. Двигун має 12 рівномірно розміщених циліндрів, що забезпечує врівноваженість та можливість пуску при будь-якому положенні ротора. 12РПД-4,4/1,75 є короткоходовим, відношення хода поршня S до діаметра циліндра D дорівнює $S/D = 0,4$.

Значення тиску сірководню на вході в роторно-поршневу розширювальну машину (табл. 1) визначено

но в діапазоні глибин занурення трубопроводу 0...1000 м, при температурі 280...285 К та газовмісті сірководню в морській воді 0,0...10,0 м³/м³ [6].

Таблиця 1

Значення тиску сірководню на вході в роторно-поршневу розширювальну машину

Глибина, м	Газовміст сірководню, м ³ /м ³			
	2	5	7,5	10
	Тиск сірководню на вході, МПа			
250	0,2903	0,6798	0,8330	0,9689
500	0,3703	0,8768	1,1159	1,3254
750	0,4171	0,9920	1,2814	1,5339
1000	0,4503	1,0737	1,3988	1,6819

Визначення основних параметрів робочого тіла та робочого процесу виконано для добового видобутку морської води 100 м³/добу

Розраховано значення ефективної потужності розширювальної машини в залежності від газовмісту та глибини занурення трубопроводу (рис. 2). Для газовмісту 2,5 м³/м³ при глибини занурення підйомного трубопроводу $H = 250...1000$ м потужність розширювальної машини становить 0,20...0,61 кВт, для газовмісту 5 м³/м³ – 0,65...0,86 кВт, для газовмісту 7,5 м³/м³ – 1,20...1,87 кВт, для газовмісту 10 м³/м³ – 1,65...2,55 кВт.

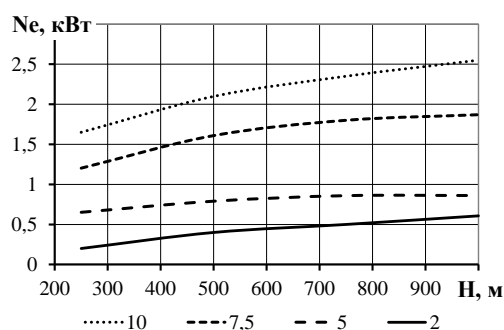


Рис. 2. Ефективна потужність розширювальної машини в залежності від газовмісту та глибини занурення трубопроводу (видобуток води 100 м³/добу)

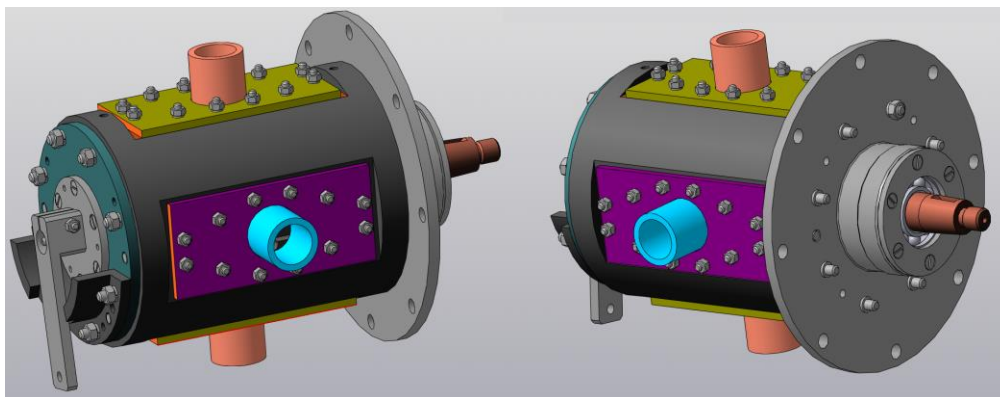


Рис. 1. Сірководнева роторно-поршневa розширювальна машина

На рис. 3 наведені індикаторні діаграми роботи сірководневої розширювальної машини.

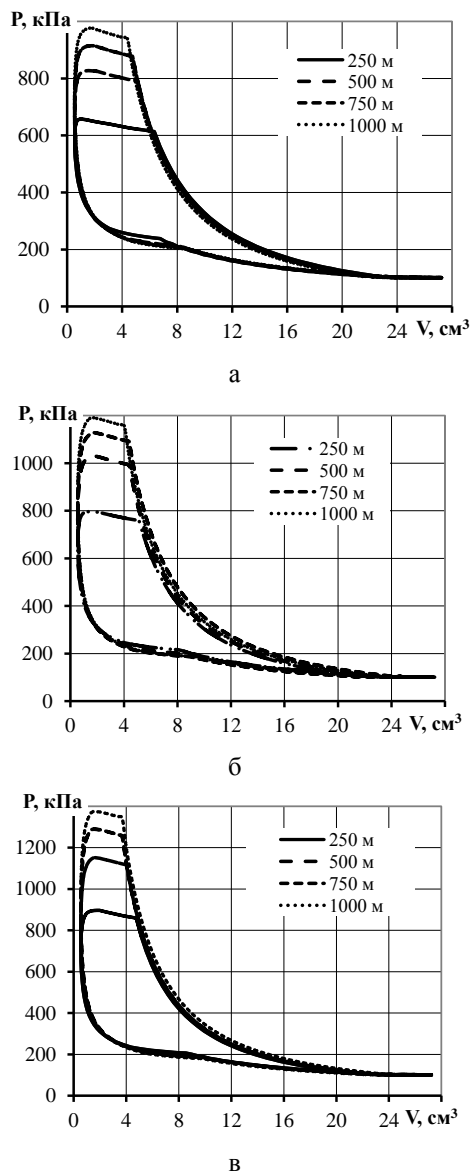


Рис. 3. Індикаторні діаграми роботи сірководневої розширювальної машини при газовмістості $5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (а), $7,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (б) та $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (в)

Зміна ефективних показників сірководневої розширювальної машини залежно від величини тиску сірководню на вході наведена на рис. 4.

З графіка видно, що з підвищенням тиску на вході ефективний ККД сірководневої розширювальної машини лежить у межах $0,21 \dots 0,49$. Також з підвищенням тиску на вході зменшується питома ефективна витрата із $51,5$ до $25,17 \text{ кг/кВт}\cdot\text{год}$. Низькі значення питомої ефективної витрати сірководню й високі значення ефективного ККД обумовлені конструктивними особливостями роторно-поршневої розширювальної машини, які поєднують переваги поршневих та роторних двигунів.

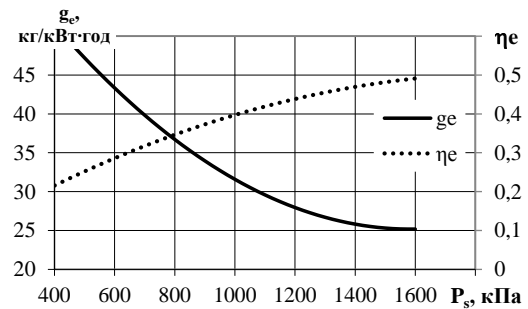


Рис. 4. Зміна ефективної витрати сірководню g_e та ефективного ККД від величини тиску на вході в розширювальну машину

Висновки

Розглянуто ефективність використання роторно-поршневого двигуна 12РПД-4,4/1,75 в якості розширювальної машини енерготехнологічної установки видобування сірководню з глибин Чорного моря.

Розраховано значення ефективної потужності розширювальної машини в залежності від газовмісту сірководню у морській воді та глибини занурення трубопроводу, яка змінюється в межах $0,2 \dots 2,55 \text{ кВт}$.

Отримано індикаторні діаграми роботи розширювальної машини в залежності від газовмісту сірководню у морській воді та глибини занурення трубопроводу.

Визначено значення ефективної витрати сірководню та ефективного ККД від величини тиску на вході в розширювальну машину.

Література

1. Бондаренко, Г. Н. Проблема извлечения сероводорода из глубинных вод Черного моря [Текст] / Г. Н. Бондаренко, И. Л. Колябина, О. В. Маринич // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2009. – № 2. – С. 92-97.
2. Димитров, Д. Черное море – нетрадиционный энергетический и сырьевой центр Европы [Текст] / Д. Димитров, П. Димитров // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2010. – № 2. – С. 27-34.
3. Михайлюк, О. Л. Перспективи використання енергетичного потенціалу сірководню чорного моря [Текст] / О. Л. Михайлюк // Науковий вісник ОНУ. – 2012. – № 21 (173). – С. 91-100.
4. Альтернативная сероводородная энергетика Черного моря, состояние, проблемы и перспективы. Часть I [Текст] / И. М. Неклюдов, Б. В. Борц, О. В. Полевич и др. // Водородная энергетика и транспорт. – 2006. – № 12 (44). – С. 23-30.
5. Ефективність енерготехнологічної установки щодо видобування сірководню з глибин Чорного моря [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін // Авіаційно-

космическая техника и технология. – 2019. – № 7 (159). – С. 50-57.

References

1. Bondarenko, G. N., Kolyabina, I. L., Marinich, O. V. Problema izvlecheniya serovodoroda iz glubinykh vod Chernogo morya [The problem of extracting hydrogen sulfide from the deep waters of the Black Sea]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2009, no. 2, pp. 92-97.
2. Dimitrov, D., Dimitrov, P. Chernoe more – netraditsionnyi energeticheskii i syr'evoi tsentr Evropy [The Black Sea is an unconventional energy and raw material center of Europe]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2010, no. 2, pp. 27-34.
3. Mykhaylyuk, O. L. Perspektivy vykorystannya enerhetychnoho potentsialu sirkovodnyu chornoho mor-

ya [Prospects for the use of the Black Sea hydrogen sulfide energy potential]. *Naukovyy visnyk ONEU*, 2012, no. 21 (173), pp. 91-100.

4. Neklyudov, I. M., Borts, B. V., Polevich, O. V., Tkachenko, V. I., Shilyaev B. A. Al'ternativnaya serovodorodnaya energetika chernogo morya, sostoyanie, problemy i perspektivy. Chast' I [Alternative hydrogen sulfide energy of the Black Sea, state, problems and prospects. Part I]. *Vodorodnaya energetika i transport*, 2006, no. 12 (44), pp. 23-30.

5. Tkach, M. R., Tymoshevs'kyu, B. H., Proskurin, A. Yu., Halynkin, Yu. M. Efektyvnost' enerhotekhnologichnoyi ustanovky shchodo vydobuvannya sirkovodnyu z hlybyn Chornoho morya [Efficiency of the energy-technological plant on the extraction of hydrogen from the Black sea depth]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 7(159), pp. 50-57.

Поступила в редакцию 12.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ПОКАЗАТЕЛИ СЕРОВОДОРОДНОЙ РОТОРНО-ПОРШНЕВОЙ РАСШИРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

*М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. С. Митрофанов,
А. Ю. Проскурин, Ю. Н. Галынкин*

В статье рассмотрена эффективность использования роторно-поршневого двигателя 12РПД-4,4/1,75 в качестве расширительной машины перспективной энерготехнологической установки добычи сероводорода из глубин Черного моря. В этой установке сероводород высокого давления используется в расширительной машине для получения механической энергии, которой можно обеспечить работу насосов и другого оборудования. 12РПД-4,4 / 1,75 представляет собой 12 цилиндровый короткоходовой двигатель с соотношением $S/D = 0,4$. Особенностью двигателя является то, что для распределения рабочего тела используются впускные и выпускные отверстия, перекрытия которых осуществляется центральным ротором. Таким образом центральный ротор выполняет функцию золотника и корпуса, в котором движутся поршни. Применение золотникового распределения обеспечивает простую и компактную конструкцию. Значение давления сероводорода на входе в роторно-поршневую расширительную машину определены в диапазоне глубин погружения трубопровода 0...1000 м, при температуре 280...285 К и газосодержании сероводорода в морской воде 0,0...10,0 м³/м³. Определение основных параметров рабочего тела и рабочего процесса выполнено для суточной добычи морской воды 100 м³/сут. Рассчитано, что для газосодержания 2,5 м³/м³ при глубине погружения подъемного трубопровода $H = 250...1000$ м мощность расширительной машины составляет 0,20...0,61 кВт, для газосодержания 5 м³/м³ – 0,65...0,86 кВт для газосодержания 7,5 м³/м³ – 1,20...1,87 кВт, для газосодержания 10 м³/м³ – 1,65...2,55 кВт. Получены индикаторные диаграммы работы расширительной машины в зависимости от газосодержания сероводорода в морской воде и глубины погружения трубопровода. Определено, что с повышением давления на входе эффективный КПД сероводородной расширительной машины лежит в пределах 0,21...0,49. Также с повышением давления на входе уменьшается удельный эффективный расход с 51,5 до 25,17 кг/кВт·ч. Низкие значения удельного эффективного расхода сероводорода и высокие значения эффективного КПД обусловлены конструктивными особенностями роторно-поршневой расширительной машины, которая сочетает преимущества поршневых и роторных двигателей.

Ключевые слова: сероводород; газосодержание; расширительная машина; роторно-поршневой двигатель; индикаторная диаграмма, КПД.

INDICATORS OF HYDROGEN SULFIDE ROTOR-PISTON EXPANSION MACHINE AS PART OF AN ENERGY TECHNOLOGY PLANT

*M. R. Tkach, B. G. Tymoshevskyy, O. S. Mytrofanov,
A. Y. Proskurin, Y. M. Halynkin*

The article discusses the efficiency of applying a 12RPE-4,4/1,75 rotary-piston engine as an expansion machine for a promising energy technology plant for the production of hydrogen sulfide from the depths of the Black Sea. In this installation, high-pressure hydrogen sulfide is used in the expansion machine to produce mechanical energy, which can ensure the operation of pumps and other equipment. 12RPE -4,4/1,75 is a 12-cylinder short-stroke engine with an S/D ratio of 0.4. A feature of the engine is that for the distribution of the working fluid are

used inlet and outlet openings, the overlap of which is carried out by the central rotor. Thus, the central rotor performs the function of a slide valve and a housing in which the pistons move. The use of the spool distribution provides a simple and compact design. The pressure of hydrogen sulfide at the inlet to the rotary-piston expansion machine is determined in the range of pipeline immersion depths of 0...1000 m, at a temperature of 280 ... 285 K and gas content of hydrogen sulfide in seawater 0.0...10.0 m³/m³. The definition of the main parameters of the working fluid and the working process is performed for a daily production of seawater of 100 m³/day. It is calculated that for a gas content of 2.5 m³/m³ with a depth of immersion of the lifting pipeline $H = 250...1000$ m, the power of the expansion machine is 0.20...0.61 kW, for gas content 5 m³/m³ – 0.65...0.86 kW for gas content 7.5 m³/m³ – 1.20...1.87 kW, for gas content 10 m³/m³ – 1.65...2.55 kW. Indicator diagrams of the expansion machine operation depending on the gas content of hydrogen sulfide in seawater and the depth of immersion of the pipeline were obtained. It was determined that with an increase in pressure at the inlet, the effective efficiency of the hydrogen sulfide expansion machine lies within 0.21...0.49. Also, with an increase in inlet pressure, the specific effective consumption decreases from 51.5 to 25.17 kg/kWh. Low values of specific effective consumption of hydrogen sulfide and high values of effective efficiency are due to the design features of the rotary-piston expansion machine, which combines the advantages of the piston and rotary engines.

Keywords: hydrogen sulfide; gas content; expansion machine; rotary piston engine; indicator diagram, efficiency.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Тимошевський Борис Георгійович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Митрофанов Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Проскурін Аркадій Юрійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Галинкін Юрій Миколайович – канд. техн. наук, викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Tkach Mykhaylo Romanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua,

ORCID Author ID: 0000-0003-4944-7113, Scopus Author ID: 57202210289,

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=XqfGS0wAAAAJ>

Tymoshevskiy Boris Georgievych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua,

ORCID Author ID: 0000-0002-4649-702X, Scopus Author ID: 6506269318.

Mitrofanov Oleksandr Sergijovych – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail mitrofanov.al.ser@gmail.com,

ORCID Author ID: 0000-0003-3460-5369, Scopus Author ID: 57201666852,

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=L-btXZ4AAAAJ&hl=uk>

Proskurin Arkadii Yuriyovych – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua,

ORCID Author ID: 0000-0002-5225-6767, Scopus Author ID: 57203617130,

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LCGxGC8AAAAJ&hl=uk>

Halynkin Yurii Mykolayovych – Candidate of Engineering Sciences, Lecturer of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua,

ORCID Author ID: 0000-0001-5272-4156, Scopus Author ID: 57204396250,

https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=ix_y1CwAAAAJ