

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТАНКЕРА
ПРОЄКТУ RST27 ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
ВОДНЕВИХ ПРИСАДОК**

Д.О. Шалапко

к. т. н., доцент кафедри суднового машинобудування та енергетики,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Анотація

Вступ. З огляду на сучасний стан розвитку техніки подальше збільшення коефіцієнта корисної дії двигунів має незначний ефект, проте використання альтернативних видів палива являє собою можливість збільшити ефективність та екологічність сучасних двигунів. На сьогодні суднові двигуни використовують як паливо HFO («важке паливо»), дизельне паливо та газове паливо. **Мета.** Із застосуванням сучасних технологій використання паливних присадок та альтернативних палив пропонується провести модернізацію паливної системи суднових двигунів танкера проєкту RST27. **Результати.** Пропонується застосовувати систему невеликих добавок водню до основного палива. У результаті використання цієї технології пропонується встановити на судні сучасний електролізер та систему зберігання водню в металогідридному акумуляторі. Проведено моделювання застосування водневих домішок на головному двигуні 6L20 виробництва фірми «Wartsila». Представлено схему розташування обладнання в машинному відділенні та схему паливної системи суднової енергетичної установки. За результатами моделювання ефективна потужність двигуна збільшилася на 3,1 %, а питома ефективна витрата палива зменшилася зі 195 до 191 г/(кВт·год). При цьому немає необхідності у значному переобладнанні як машинного відділення, так і самого головного двигуна. Електрична енергія, яка необхідна для видобутку водню, може бути використана під час часткових режимів роботи дизель-генераторів, на режимі стоянки та під час переходу. **Висновки.** Економічний ефект від упровадження зазначеного науково-технічного рішення отримано за рахунок використання малих домішок водню до основного палива та скорочення витрати палива двигунами енергетичної установки танкера проєкту RST27. За попередніми розрахунками економічний ефект становитиме до 200 доларів США на день, що в перерахунку на один перехід рейсовою лінією Єгипет – Україна становитиме більше 1500 доларів США з урахуванням витрат на водень.

Ключові слова: експлуатація суднової енергетичної установки, двигун внутрішнього згорання, водень, альтернативне паливо, металогідридний акумулятор.

IMPROVING THE TANKER PROJECT RST27 SHIP POWER PLANT
PERFORMANCE BY HYDROGEN ADDITIVES USAGE

D.O. Shalapko

Ph.D., Associate Professor at the Department of Marine Engineering and Energy,
Kherson Educational-Scientific Institute
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4311-3908

Summary

Introduction. Given the current state of technology, further increase in engine efficiency has little effect, but the use of alternative fuels is an opportunity to increase the efficiency and environmental friendliness of modern engines. Today, marine engines use HFO (“heavy fuel”), diesel and gaseous fuels as fuel. **Purpose.** Using modern technologies for the use of fuel additives and alternative fuels, it is proposed to modernize the fuel system of marine engines of the tanker project RST27. **Results.** It is proposed to use a system of small additions of hydrogen to the main fuel. As a result of using this technology, it is proposed to install a modern electrolyzer and hydrogen storage system in a metal hydride battery. The application of hydrogen impurities on the 6L20 main engine manufactured by “Wartsila” was simulated. The scheme of equipment location in the engine room and the scheme of the fuel system of the ship’s power plant are presented. According to the simulation results, the effective engine power increased by 3,1 %, and the specific effective fuel consumption decreased from 195 to 191 g/(kWh). At the same time there is no need for significant re-equipment of both the engine room and the main engine. The electrical energy required for hydrogen production can be used during the partial operation of diesel generators, in the parking mode, and during the transition. **Conclusions.** The economic effect of the implementation of this scientific and technical solution is obtained through the use of small impurities of hydrogen to the main fuel and reduce fuel consumption by engines of the power plant of the tanker project RST27. According to preliminary estimates, the economic effect will be up to 200 USD per day, which in terms of one crossing on the Egypt – Ukraine route will be more than 1500 USD taking into account the cost of hydrogen.

Key words: ship power plant operation, internal combustion engine, hydrogen, alternative fuel, metal hydride battery.

Вступ. Майже третина всієї нафти, що видобувається сьогодні, витрачається на транспортну енергетику, тому проблема раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів у світі є дуже актуальною. Обмежені запаси викопних ресурсів зумовлюють приділення уваги можливості використання альтернативних видів палива у транспортних установках (далі – ТУ). Найближчими десятиліттями для малих і середніх ТУ перспективними видами двигунів вважаються дизельні установки та двигуни внутрішнього згорання з примусовим запалюванням. У зв’язку із цим головною проблемою розвитку транспортної енергетики є забезпечення ефективної роботи двигунів, які використовують альтернативне паливо [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В енергетичних комплексах із двигунами внутрішнього згорання можуть використовуватися різні види

альтернативного палива: етиловий і метиловий спирти [2], олії рослинного походження (пальмова, соєва, соняшникова, рапсова) [3], природні та попутні гази, конденсований газ [4], водень [5], синтез-газ (переважно 40–70 % водню та оксиду вуглецю [6]).

Очевидно, що водень є найбільш перспективним альтернативним паливом [4]. Людство має необмежені запаси елемента № 1 періодичної системи Менделєєва. Переобладнання поршневих двигунів на водень є правильним способом усунення парникового ефекту та вирішення проблеми забруднення повітряного басейну планети [5].

З кожним роком інтерес до досліджень у сфері альтернативних видів палива тільки зростає. Здебільшого це відбувається з двох причин: а) швидке скорочення розвіданих ресурсів нафти в результаті активного видобування вуглеводнів (див. рис. 1); б) погіршення екологічної ситуації у світі через постійне збільшення кількості поршневих двигунів, що використовуються в усьому світі.



Рис. 1. Динаміка зростання цін на нафту у світі за 5 років

Використання водню як палива для двигунів внутрішнього згорання є складною проблемою, що включає широкий спектр питань:

- можливість переобладнання сучасних двигунів для роботи на водні;
- вивчення процесу роботи двигунів, що працюють на водні;
- визначення оптимальних способів налагодження робочого процесу для забезпечення мінімальної токсичності та максимального коефіцієнта корисної дії двигуна;
- розроблення системи подачі палива, що забезпечує ефективну організацію робочого процесу в циліндрах двигуна внутрішнього згорання;
- розроблення ефективних методів зберігання водню на борту транспортних засобів.

Однак, попри привабливість розглянутих способів використання палива, не варто забувати також про його недоліки. Варто зазначити, що сьогодні одержання водню є складним завданням та потребує окремих досліджень [2].

Постановка проблеми. Найпростішим способом отримання водню є електроліз води. У результаті одержується суміш водню та кисню. Недоліком цього способу є високі витрати енергії. Отримання 1 м³ водню потребує використання 4 кВт енергії, коли 1 м³ водню може виділити лише 1,8 кВт в паливному елементі з високим рівнем ефективності. Попри це електроліз залишається перспективним напрямом [4].

Окремо вважається, що у випускних газах двигуна з водневим двигуном присутня тільки вода, тому з екологічної позиції такий двигун абсолютно безпечний. Однак водень, хоч і є найбільш екологічно чистим з-поміж відомих видів палива, призводить до значного збільшення викидів оксидів азоту теплового походження у відпрацьованих газах. Таке збільшення є причиною зростання температури циклу та приросту швидкості згорання палива.

Формулювання цілей статті. Із застосуванням сучасних технологій використання паливних присадок та альтернативних палив пропонується провести модернізацію паливної системи суднових двигунів танкера проєкту RST27.

Виклад основного матеріалу. Проведено аналіз ефективності застосування малих домішок водню до основного дизельного палива на дизельній енергетичній установці танкера «SVL LIBERTY» [9] дедвейтом 6970 тон (див. рис. 2). Судно зафрахтоване нафтовою компанією «SVL» та призначене для транспортування сирої нафти портами Чорного, Каспійського і Середземного морів. Силова установка танкера містить два головні двигуна W6L20 (6ЧН20/28) специфікаційною потужністю 1200 кВт виробництва фірми «Wartsila», а також три допоміжні дизельні генератори «Volvo Penta D12 MGKS» потужністю кожного двигуна 292 кВт.



Рис. 2. Загальний вигляд танкера «SVL LIBERTY»

Схема суднової енергетичної установки зазначеного танкера з використанням малих домішок водню наведена на рисунку 3, а на рисунку 4 – загальне розташування машинно-котельного обладнання в машинному відділенні.

Витратний паливний трубопровід ГД, ДГ та АДГ

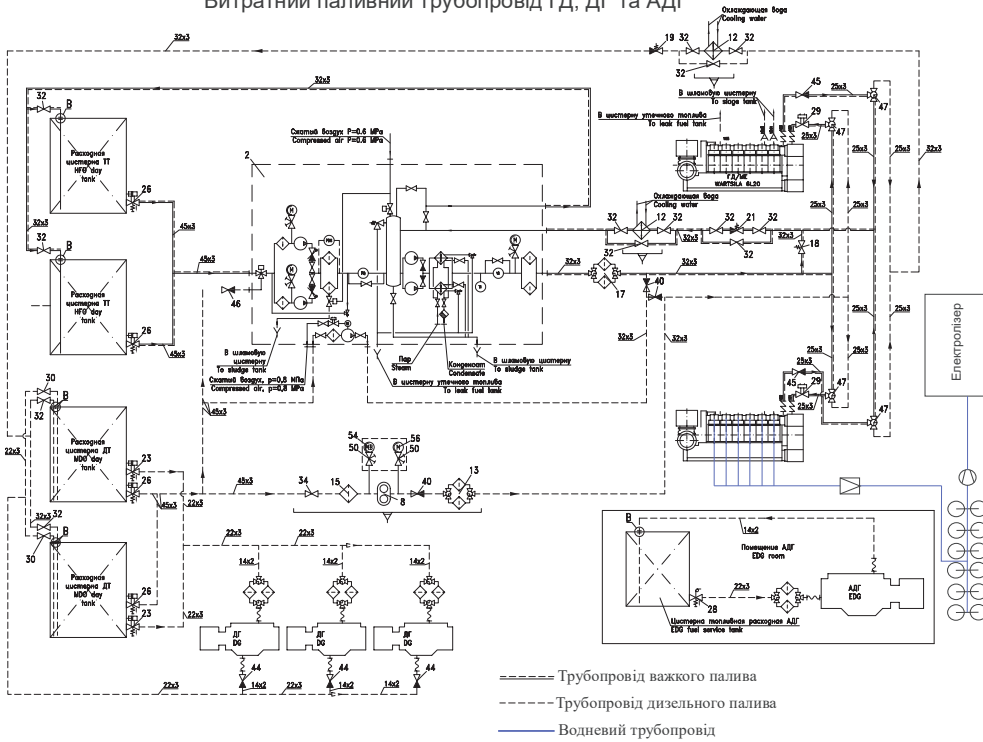


Рис. 3. Схема паливної системи суднової дизельної електростанції танкера «SVL LIBERTY» з використанням дрібних домішок водню

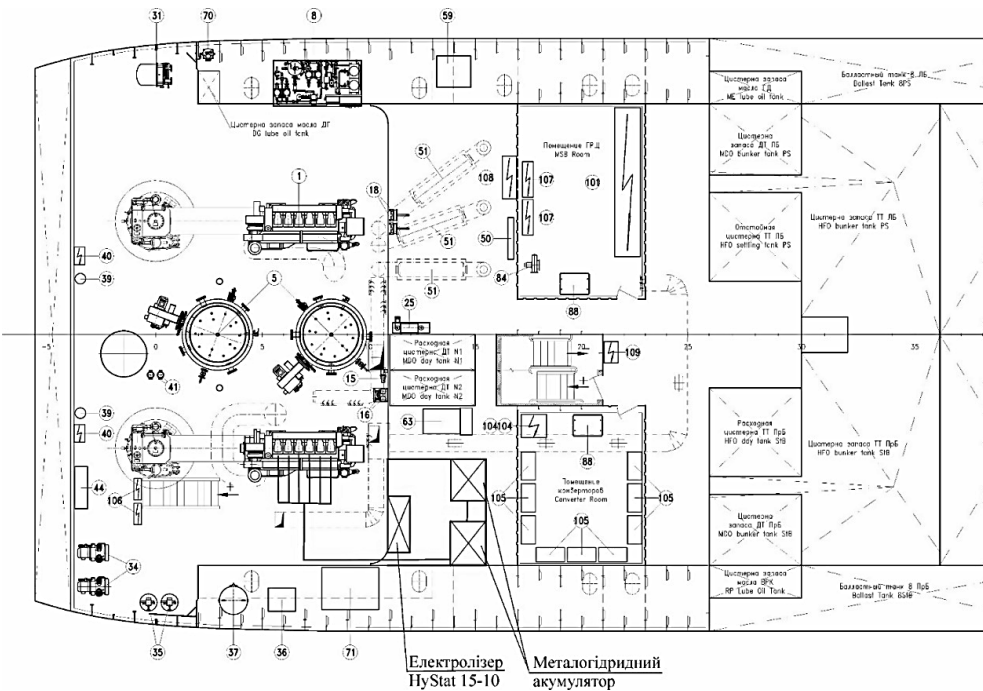


Рис. 4. План розташування машинного відділення

Устаткування для електролізу та водню на борту танкера цілком раціонально розміщене в машинному відділенні. За оціночними розрахунками (з використанням електролізера HySTAT®-15-10 [10]) розміри цього обладнання, зібраного в один блок, становлять $1,7 \times 1,85 \times 2,6$ м (див. рис. 4), а маса – близько 1,5 тони.

Двигуни 6L20 (6ЧН20/28) фірми «Wartsila» [8] (див. табл. 1, рис. 5) використовуються в судновій енергетиці як основні та допоміжні двигуни різних типів суден, а також як дизель-генератори наземних електростанцій.

Таблиця 1

Параметри двигуна 6L20

Тип двигуна	Чотиритактний, реверсивний, односторонньої дії, з газотурбінним наддувом, розташування циліндрів – рядне, вертикальне
Модель двигуна	Правильна
Напрямок обертання колінчастого валу під час роботи на передній передачі (з боку вихідного фланця)	За годинниковою стрілкою
Порядок роботи циліндрів	1-3-5-4-2-6
Порядок нумерації циліндрів	Від носа до корми
Діаметр циліндра, мм	200
Хід поршня, мм	280
Кількість циліндрів	6
Наддув	Одноступеневий ізобарний газотурбінний із повітряним охолодженням після компресора
Тип турбокомпресора	TCR-18
Частота обертання к.в./хв ⁻¹	1000

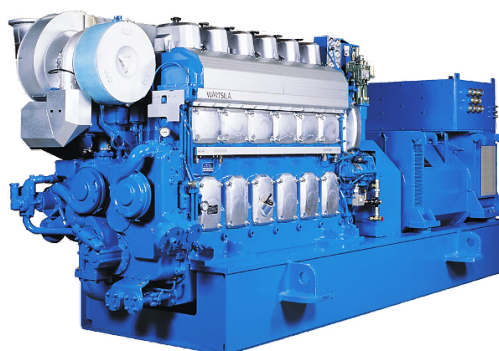


Рис. 5. Загальний вигляд двигуна 6ЧН20/28

На основі уточнених характеристик згоряння палива та показників тепловиділення проведено математичне моделювання робочого процесу двигуна 6L20 за різних значень тиску добавки водню. З огляду на експериментальні дослідження [4] та дані літературних джерел щодо застосування водневих добавок [1–3] значення коефіцієнта надлишку повітря було прийняте як $\alpha = 2,1$, кут випередження впорскування перебуває в межах $\varphi = 12 \pm 1^\circ$ п. к. в.

Зміна ефективних показників двигуна 6L20 показана на рис. 6.

Використання невеликих домішок водню до основного палива приводить до збільшення ефективної потужності з 1313 до 1350 кВт, при цьому зазначена витрата палива зменшується зі 178 до 173 г/(кВт·год) з додаванням 0,11 % домішки водню (за масою). При цьому приріст потужності становитиме 2,8 %, а зниження питомого показника витрати палива – 2,9 %.

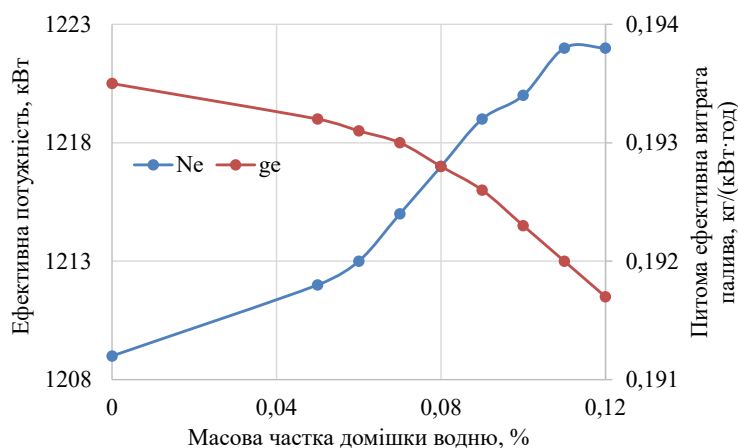


Рис. 6. Ефективні показники роботи двигуна 6L20 за зміни кількості домішки водню

Порівняно з двигуном 1Ч8,6/7,2 [6], де тиск упорскування палива значно нижчий, ніж у двигуна 6L20 (19,5 МПа проти $70,0 \pm 5$ МПа), це зумовлено тим, що ефективність використання малих домішок водню залежить від тиску впорскування, а також від налаштувань системи подачі палива.

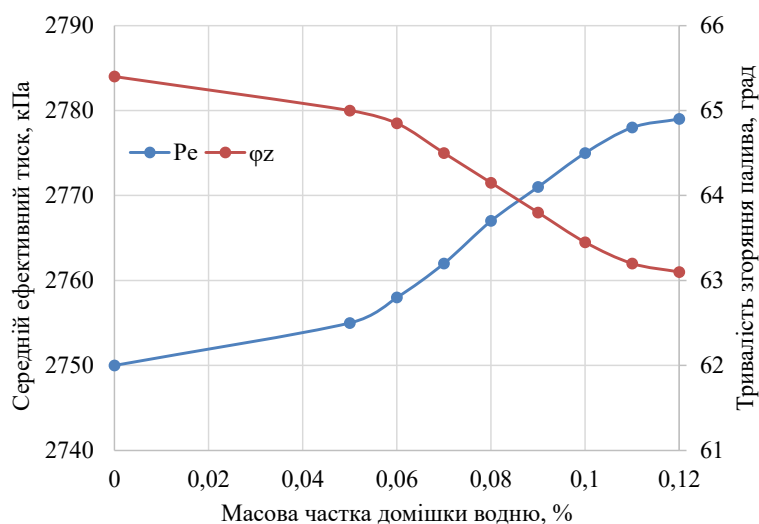


Рис. 7. Залежність середнього ефективного тиску (Pe) та тривалості згоряння палива (φz) від вмісту домішок водню

За значення концентрації домішки водню 0,1 % (за масою) отримано відповідне значення ефективної потужності 1222 кВт, середній ефективний тиск – 2,78 МПа, мінімальна питома ефективна витрата палива – 0,191 кг/(кВт·год).

Найвпливовішими параметрами робочого циклу двигуна під час використання малих домішок водню є тривалість горіння φ_z , кут випередження запалювання $\varphi_{оп}$ та коефіцієнт надлишку повітря α .

Висновки. Нині головний двигун і дизель-генератори судна «SVL LIBERTY» проекту RST27 працюють на дизельному паливі за стандартом ISO8217, категорія ISO-F-DMB та споживають 0,5 т палива на годину, або 12 т на добу, за умови 0,85 Ne. За вартості цього палива станом на 1 січня 2022 р. в розмірі 900 доларів США за 1 тону щоденна вартість палива становитиме 10 800 доларів США.

Розрахунки, проведені на основі математичного моделювання з урахуванням експериментальних даних за методикою економічного розрахунку, розробленою в Херсонському навчально-науковому інституті Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, показують, що в разі добавки 0,1 % водню його витрата становитиме 12 кг на добу. Якщо вартість водню, отриманого електролізом, становить 8,96 доларів США за 1 кг, щоденна вартість водню становитиме 108 доларів США.

У разі використання 0,1 % (за масою) домішки водню питома ефективна витрата основного палива зменшується на 3–7 %. Додавання 0,1 % водню до основного палива приведе до зниження витрати палива на ~3 %. З огляду на позитивний ефект від використання малих домішок водню добова витрата палива зменшиться та становитиме 11,64 тони, а вартість палива на добу становитиме 10 476 доларів США. Таким чином, щоденна економія на паливі становитиме 324 долари США на добу. З урахуванням вартості водню загальний економічний ефект становитиме 216 доларів на добу.

У разі транспортування нафти з Єгипту в Україну із середньою довжиною рейсової лінії 1800 миль і середньою швидкістю 10 вузлів економія за використання малих домішок водню становитиме ~1550 доларів США за перехід.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню. *Водний транспорт*. 2016. № 2 (25). С. 24–28.
2. Утилизация теплоты вторичных энергоресурсов судовых малооборотных двигателей, работающих на альтернативном топливе / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко, Ю. Н. Галынкин, Д. О. Шалапко. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2017. № 2. С. 8–13.
3. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. № 3 (62). Т. 1. С. 233–237.

4. Shalapko D. O. An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 6. № 1 (44). P. 36–40.
5. Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line / M. R. Tkach, B. G. Tymoshevskyy, D. O. Shalapko, A. Yu. Proskurin, O. M. Mitrophanov. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2018. Вип. 1 (9). С. 87–91.
6. Шалапко Д. О. Непрямі методи дослідження ефекту використання малих домішок водню до основного палива. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 6 (150). С. 44–51.
7. Правила технической эксплуатации морских и речных судов. Дизели. КПД 31.2.002.02-96: нормативный документ морского транспорта Украины. Киев, 1997. 64 с.
8. L20 IMO Tier II – Marine Engines PRODUCT GUIDE. Wartsila, November 2018. 228 p. URL: <https://www.wartsila.com>
9. Танкер проекта RST27: основные характеристики, назначение и техническая документация (2011). *Smart Maritime Group*. URL: <https://smart-maritime.com/ru/reference-list/tankery/proekt-rst27/>
10. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS. Oevel, Belgium, 2017. 16 p. URL: <https://www.hydrogenics.com>

REFERENCES

1. Tymoshevskiy, B. H., Tkach, M. R., Shalapko, D. O. (2016). Improving the performance of diesel engines by adding hydrogen [Polipshennia robochykh kharakterystyk dyzelnykh dvyhunyiv za dopomohoiu dodavannia vodniu]. *Vodnyy transport – Water transport*, no. 2 (25), pp. 24–28. [in Ukrainian]
2. Tkach, M. R., Tymoshevskiy, B. G., Dotsenko, S. M., Galynkin, Yu. N., Shalapko, D. O. (2017). Utilization of heat from secondary energy resources of ship low-speed engines operating on alternative fuel [Utilizatsiya teploty vtorichnykh energoresursov sudovykh malooborotnykh dvigateley, rabotayushchikh na al'ternativnom toplive]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya – Internal combustion engines*, no. 2, pp. 8–13. [in Russian]
3. Tymoshevskiy, B. H., Tkach, M. R., Shalapko, D. O. (2017). The main provisions of the mathematical model of hydrogen addition on the high pressure line of fuel equipment [Osnovni polozhennia matematychnoi modeli dodavannia vodniu na linii vysokoho tysku palyvnoi aparatury]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, no. 3 (62), vol. 1, pp. 233–237. [in Ukrainian]
4. Shalapko, D. O. (2018). An experimental study of the wave effect in fuel equipment using hydrogen additives to diesel fuel. *Technology audit and production reserves*, vol. 6, no. 1(44), pp. 36–40 [in English].

5. Tkach, M. R., Tymoshevskyy, B. G., Shalapko, D. O., Proskurin, A. Yu., Mitrophanov, O. M. (2018). Methods to improve the performance of diesel engines by adding hydrogen into high pressure line. *Shipbuilding & marine infrastructure*, iss. 1 (9), pp. 87–91. [in English]
6. Shalapko, D. O. (2018). Indirect methods of studying the effect of the use of small impurities of hydrogen in the main fuel [Nepriami metody doslidzhennia efektu vykorystannia malykh domishok vodniu do osnovnoho palyva]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, no. 6 (150), pp. 44–51. [in Ukrainian]
7. Rules for the technical operation of sea and river vessels. Diesels. KPD 31.2.002.02-96: regulatory document of Ukrainian maritime transport [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii morskikh i rechnykh sudov. Dizeli. KPD 31.2.002.02-96: normativnyy dokument morskogo transporta Ukrainy] (1997). Kyiv, 64 p. [in Russian]
8. L20 IMO Tier II – Marine Engines PRODUCT GUIDE (2018). Wartsila, 228 p. Retrieved from: <https://www.wartsila.com> [in English]
9. Smart Maritime Group (2011). RST27 project tanker: main characteristics, purpose and technical documentation [Tanker proekta RST 27: osnovnye kharakteristiki, naznachenie i tekhnicheskaya dokumentatsiya]. Retrieved from: <https://smart-maritime.com/ru/reference-list/tankery/proekt-rst27/> [in Russian]
10. HySTAT® HYDROGEN GENERATORS (2017). Oevel, Belgium, 16 p. Retrieved from: <https://www.hydrogenics.com> [in English]