

УДК 629.5.035.5:621.43.068.4

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.14](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.14)**DETERMINATION AND OPTIMIZATION OF THE MAIN DUAL-FUEL ENGINE POWER FOR LNG CARRIERS UNDER VARIABLE CONDITIONS OF BOIL-OFF GAS GENERATION AND UTILIZATION****ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПОТУЖНОСТІ ГОЛОВНИХ ДВОПАЛИВНИХ ДВИГУНІВ LNG-ТАНКЕРІВ ЗА УМОВ ВАРІАБЕЛЬНОГО УТВОРЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ВИПАРОВАНОГО ГАЗУ****Vasyl S. Nalyvaiko¹**

vasyl.nalyvaiko@nuos.edu.ua

ORCID: 0009-0009-6030-0287

Borys G. Tymoshevskyy¹

borys.tymoshevskyy@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4649-702X

Roman Yu. Avdiunin²

roman.avdiunin@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-0798-8077

Oleksandr M. Popov¹

popov_metc@ukr.net

ORCID: 0009-0000-4690-8119

В. С. Наливайко¹,

канд. техн. наук, професор

Б. Г. Тимошевський¹,

докт. техн. наук, професор

Р. Ю. Авдюнін²,

викладач

О. М. Попов¹,

аспірант

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*²*Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson*¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*²*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*

Abstract. Purpose. The aim of this study is to develop a scientifically substantiated methodology for determining and optimizing the effective power of main dual-fuel engines of LNG carriers, taking into account the variable generation and utilization of boil-off gas (BOG). Particular attention is paid to establishing the quantitative influence of the daily evaporation rate, tank capacity, gas lower heating value, engine effective efficiency, and the share of heat supplied by liquid pilot fuel on the attainable and maximum permissible power of low-speed two-stroke gas-diesel engines. The study is focused on creating a universal engineering tool to ensure consistency between propulsion plant parameters and BOG management processes.

Methodology. The study employs analytical and graph-analytical approaches. Based on the energy balance between the volume of generated boil-off gas and its consumption by the main engine, analytical relationships were derived to determine the effective power considering six key parameters: α , P_w , η_e , $QLHV$, q , and β . To account for operational limitations associated with knock combustion at low pilot fuel fractions, a corrective power reduction coefficient was introduced. The multiparameter relationship was transformed into a combined nomogram format, enabling rapid engineering assessments without complex computational procedures. The methodology was validated using a case study of an actual LNG carrier with known operational characteristics.

Results. A generalized formula was obtained for determining both the limiting and attainable power of the main engine, taking into account the actual BOG generation profile and fuel supply mode. The developed universal nomogram allows the effective power to be determined over a wide range of operating conditions, including variations in gas composition and evaporation intensity. Practical validation demonstrated that the calculated values of the liquid fuel heat share and engine power are consistent with actual operational data, confirming the adequacy of the model. It was established that an increase in the daily evaporation rate or a decrease in gas heating value necessitates adjustment of the liquid fuel fraction to ensure stable engine operation and achievement of the vessel's design speed.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the integrated combination of thermodynamic analysis of BOG generation processes with the working cycle parameters of a dual-fuel engine within a unified analytical model. For the first time, a universal graph-analytical interpretation of the multifactor power dependence in the form of a nomogram is proposed,

taking into account knock resistance limitations of two-stroke gas-diesel engines. An approach was developed for the quantitative assessment of the influence of fuel composition and natural gas properties on the energy potential of a ship power plant under variable thermal loading of cryogenic tanks.

Practical significance. The proposed methodology can be applied at the conceptual and technical design stages of LNG carriers to optimize the selection of the type and rated power of the main propulsion plant, considering cargo capacity and expected evaporation levels. In operational practice, it enables determination of the optimal fuel mode of dual-fuel engines, minimization of cargo losses, reduction of liquid fuel consumption, and compliance with IMO Tier III environmental requirements. The methodology can also be adapted for the analysis of modern propulsion systems such as ME-GI and X-DF, as well as for integration with gas reliquefaction systems, thereby expanding its applicability in the context of the evolving global LNG shipping fleet.

Key words: LNG carrier; dual-fuel engine; boil-off gas (BOG); engine power determination; power optimization; nomogram; energy efficiency.

Анотація. Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої методики визначення та оптимізації ефективної потужності головних двопаливних двигунів LNG-танкерів з урахуванням варіабельного утворення та утилізації випарованого газу (BOG). Особливу увагу приділено встановленню кількісного впливу добової норми випаровування, вантажомісткості танків, теплотворної здатності газу, ефективного ККД двигуна та частки теплоти від рідкого запального палива на досяжну та гранично допустиму потужність малооборотних двотактних газодизельних двигунів. Дослідження спрямоване на створення універсального інженерного інструменту для забезпечення узгодженості між параметрами енергетичної установки та процесами управління BOG.

Методика. У роботі використано аналітичний та графоаналітичний підходи. На основі енергетичного балансу між об'ємом випарованого газу та його споживанням головним двигуном отримано аналітичні залежності для визначення ефективної потужності з урахуванням шести ключових параметрів: α , $P_{\text{в}}$, $\eta_{\text{е}}$, $Q_{\text{г}}$, q та β . Для врахування обмежень, пов'язаних із детонаційним згорянням при малих значеннях частки рідкого палива, введено коригувальний коефіцієнт зниження потужності. Багатопараметричну залежність трансформовано у форму комбінованої номограми, що дозволяє здійснювати швидкі інженерні оцінки без складних обчислювальних процедур. Валідацію методики виконано на прикладі реального LNG-танкера з відомими експлуатаційними характеристиками.

Результати. Отримано узагальнену формулу для визначення граничної та досяжної потужності головного двигуна з урахуванням фактичного профілю утворення BOG та режиму паливоподачі. Побудована універсальна номограма дозволяє визначати ефективну потужність у широкому діапазоні експлуатаційних умов, включаючи зміну складу газу та інтенсивності випаровування. Практична апробація показала, що розрахункові значення частки теплоти від рідкого палива та потужності узгоджуються з фактичними експлуатаційними даними судна, що підтверджує адекватність моделі. Встановлено, що при зростанні добової норми випаровування або зменшенні теплотворної здатності газу виникає необхідність коригування частки рідкого палива для забезпечення стабільної роботи двигуна та досягнення проектної швидкості судна.

Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні термодинамічного аналізу процесів утворення BOG із параметрами робочого циклу двопаливного двигуна в єдиній аналітичній моделі. Уперше запропоновано універсалізовану графоаналітичну інтерпретацію багатофакторної залежності потужності у вигляді номограми, що враховує обмеження, пов'язані з детонаційною стійкістю двотактних газодизельних двигунів. Розроблено підхід до кількісної оцінки впливу паливної складової та складу природного газу на енергетичний потенціал суднової установки в умовах змінного теплового навантаження криогенних танків.

Практична значимість. Запропонована методика може бути використана на етапах концептуального та технічного проектування LNG-танкерів для оптимізації вибору типу та номінальної потужності головної енергетичної установки з урахуванням вантажомісткості та очікуваного рівня випаровування. В експлуатаційній практиці вона дозволяє визначати оптимальний паливний режим роботи двопаливних двигунів, мінімізувати втрати вантажу, знижувати витрати рідкого палива та забезпечувати відповідність екологічним вимогам IMO Tier III. Методика також може бути адаптована для аналізу сучасних установок типу ME-GI та X-DF, а також для інтеграції з системами повторного зрідження газу, що розширює можливості її застосування в умовах розвитку світового флоту LNG-перевезень.

Ключові слова: метановоз; двопаливний двигун; випарований газ; визначення потужності двигуна; оптимізація потужності; номограма; енергоефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Історія розвитку суднових енергетичних установок для танкерів, що перевозять зріджений природний газ (ЗПГ), пройшла значний шлях від паротурбінних установок до сучасних високоефективних двопаливних двигунів. У 1980-1990-х роках відбувся перехід до більш економічних дизельних двигунів середньо- та малооборотного типу. Вони могли працювати на традиційному рідкому паливі з частковим додаванням випарованого газу (BOG), що стало важливим кроком у напрямку підвищення економічності, зниження викидів шкідливих речовин та покращення екологічних характеристик суднових енергетичних установок. Цей етап розвитку заклав технологічну основу для подальшого широкого впровадження двопаливних (dual-fuel) та газодизельних технологій, які домінують на сучасному ринку великих метановозів [1].

На сучасних метановозах для роботи головних двигунів використовується частина зрідженого природного газу (ЗПГ), що неминує випаровується під час рейсу через приток тепла від навколишнього середовища, у поєднанні з тією чи іншою кількістю рідкого запального палива. Потужність, яку можна отримати при такій комбінованій схемі живлення, істотно варіює залежно від низки технологічних та експлуатаційних чинників [2, 3], серед яких ключовими є:

- обсяг перевезеного ЗПГ (вантажомісткість танків, P_w): визначає загальну масу вантажу і, відповідно, потенційний абсолютний рівень добових випаровувань;
- добова норма випаровування (Boil-off Rate, α): частка газу, що переходить у парову фазу за добу, залежить від термодинамічних умов зберігання (температури, тиску), теплоізоляційних характеристик криогенних танків (типів Mark III, NO96, CS1 та ін.), а також від зовнішніх умов;
- теплотворна здатність (нижча теплота згоряння Q_H) газу: змінюється в залежності від хімічного складу природного газу (вмісту метану CH_4 , етану C_2H_6 , пропану C_3H_8 , азоту N_2 та інших компонентів), що, у свою чергу, залежить від родовища видобутку;
- експлуатаційні режими суднової енергетичної установки: включають навантаження двигунів, тривалість рейсу, швидкісні характеристики судна, час роботи на маневрених режимах;
- зовнішні фактори: кліматичні умови плавання (температура забортної води та повітря), інтенсивність теплообміну з морською водою.

Особливу увагу при проектуванні та експлуатації приділяють контролю параметрів boil-off gas (BOG). Утворений газ призводить до росту тиску в танках, що створює потенційну загрозу безпеці. Його добовий обсяг зазвичай становить 0,10...0,15% від маси вантажу для сучасних ізольованих танків, проте може зростати за несприятливих умов. Таким чином,

гранично допустима потужність головних двопаливних двигунів визначається не лише гідродинамічними характеристиками корпусу судна та потужністю, необхідною для досягнення заданої швидкості, а й здатністю енергетичної системи ефективно утилізувати або повторно скраплювати BOG, не допускаючи його скидання в атмосферу через клапани безпеки [3]. Недооблік цього фактора може призвести до недосягнення проєктної швидкості або нераціонального використання палива.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є розробка методики оцінки гранично допустимих та досяжних значень потужностей головних двигунів суден-метановозів, що працюють на суміші випарованого газу (BOG) та рідкого запального палива, а також виявлення та кількісний аналіз впливу ключових факторів, специфічних для цього типу суден. Особливий акцент робиться на малооборотних двопаливних двигунах внутрішнього згоряння (Slow-Speed Dual-Fuel Engines), що забезпечують пряму передачу потужності на гребний гвинт, оскільки саме вони є основним типом енергетичних установок сучасних великих LNG-танкерів внаслідок високої ефективності, надійності та паливної гнучкості.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика дослідження ґрунтується на аналітичному та графоаналітичному підходах. Основним методом є графоаналітичне моделювання для визначення ефективної потужності головних двигунів N_e як функції від шести ключових змінних q , P_w , η_e , α , Q_H та g_{ef} . Аналітична основа включає виведення розрахункових формул з подальшою їх візуалізацією у формі комплексної номограми. Об'єктом дослідження є процеси паливоподачі та робочого циклу двопаливних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на судах-метановозах, а також супутні процеси випаровування вантажу під час його транспортування. Предметом дослідження виступають закономірності зміни досяжної та необхідної потужності малооборотних двопаливних двигунів у залежності від сукупності термодинамічних, конструктивних, експлуатаційних та зовнішніх факторів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Кількість газу, що випаровується за добу, обчислюється за наведеним виразом

$$W_{доб} = k \cdot \alpha \cdot P_w, \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт об'ємного розширення при переході ЗПГ з рідкого в газоподібний стан за нормальних умов (для метану та газів з його високим вмістом приймається $k = 625$); α – середній добовий показник випаровування, $\text{м}^3/\text{добу}$; P_w – вантажна місткість танків, м^3 .

Для базового розрахункового випадку приймається, що весь BOG, що утворюється під час експлуатації

судна, спрямовується у паливну систему і використовується в головних двигунах у поєднанні з необхідною кількістю рідкого запального палива.

При відомій питомій витраті газоподібного палива головним двигуном $g_{eГ}$ м³/(кВт·год) та його потужності N_e , добова витрата газу становитиме

$$W_{доб} = 24 \cdot g_{eГ} \cdot N_e, \text{ м}^3/\text{добу}. \quad (2)$$

Прирівнюючи об'єм газу, що утворюється (1), до об'єму газу, що споживається двигуном (2), отримуємо вираз для потужності

$$N_e = \frac{625\alpha \cdot P_w}{24 \cdot g_{eГ}}, \text{ кВт}. \quad (3)$$

Для двопаливних ДВЗ з газодизельним циклом, де запалення газоповітряної суміші відбувається від вприскування та згоряння порції рідкого палива, питома витрата газоподібного палива визначається

$$g_{eГ} = \frac{3600(1-q)}{\eta_e Q_n}, \text{ м}^3/(\text{кВт} \cdot \text{год}), \quad (4)$$

де q – частка теплоти, що вноситься в циліндр рідким запальним паливом, від загальної кількості теплоти, яка виділяється при згорянні; η_e – ефективний ККД двигуна; Q_n – нижча теплота згоряння газу, кДж/м³.

Підставляючи (4) в (3), отримуємо залежність потужності від параметрів палива та ККД

$$N_e = 0,00725 \frac{\alpha P_w \eta_e Q_n}{1-q}, \text{ кВт}. \quad (5)$$

Важливим експлуатаційним обмеженням для двотактних газодизельних двигунів є можливість виникнення детонаційного згоряння при занадто малій частці теплоти від рідкого палива q , що призводить до необхідності зниження навантаження. Для врахування цього ефекту вводиться коригувальний коефіцієнт β , що зменшує розрахункову потужність. За даними компанії Sulzer для двигунів типу RND-90M, при 5% внеску рідкого палива потужність складає близько 76% від номіналу, а при підвищенні частки до 30% може бути досягнута номінальна потужність. У діапазоні $q = 0,05 \dots 0,30$ залежність коефіцієнта β для двигунів RMD-76 і RND-90M апроксимується лінійною функцією

$$\beta = 0,975q + 0,71. \quad (6)$$

При $q \geq 0,30$ значення β приймається рівним 1 (обмеження знімається). Цю апроксимацію в першому наближенні можна застосовувати до інших типів двотактних високопотужних газорідних двигунів.

Таким чином, з урахуванням коефіцієнта β , остаточний вираз для визначення граничних значень потужності головних двигунів метановозів набуває вигляду

$$N_e = 0,00725 \frac{\alpha P_w \eta_e Q_n}{1-q} (0,975q + 0,71), \text{ кВт}. \quad (7)$$

Параметри, що входять до формули (7), мають широкий діапазон зміни, обумовлений технологічною різноманітністю. Так, середнє добове значення

випаровування залежить від конструктивних особливостей танків, віку судна, умов та районів плавання та інших факторів, приймаємо в межах $0,001 \dots 0,003$. Основна маса сучасних LNG-танкерів мають вантажні місткості P_w приблизно $125 \dots 165$ тис. м³, що є стандартом для великомасштабних газозовів у світі [4].

Ефективний ККД η_e залежить від типу силової установки. Для паротурбінних установок (ПТУ) старого покоління – близько $0,28 \dots 0,32$; для сучасних малооборотних двопаливних двигунів (ME-GI, X-DF) – досягає $0,45 \dots 0,50$ [5].

Нижча теплота згоряння Q_n залежить від складу газу: від 20800 кДж/м³ для «бідного» газу з великим вмістом азоту до 37200 кДж/м³ для «багатого» газу з високим вмістом важких вуглеводнів.

Частка теплоти від рідкого палива q , може змінюватись від мінімального значення $0,05 \dots 0,07$ до $0,30$ і навіть до $1,0$ при роботі тільки на рідкому паливі.

Оскільки в формулу (7) входить багато величин з досить широкими межами зміни їх значень, з метою спрощення розрахунків, побудуємо номограму.

Оскільки формула (7) є багатопараметричною, для швидкої інженерної оцінки була побудована комбінована номограма (рис. 1). Для спрощення побудови вираз (7) був розчленований шляхом введення допоміжних параметрів A, B, C, D .

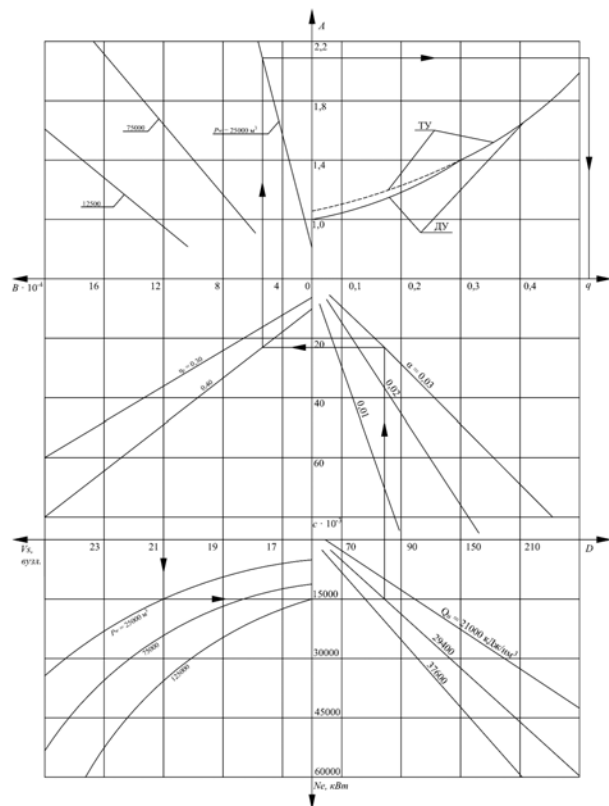


Рис. 1. Номограма для визначення ефективної потужності головних двигунів N_e в залежності від $q, P_w, \eta_e, \alpha, Q_n, g_{eГ}$

Параметр A відображає вплив частки рідкого палива та обмеження за детонацією

$$A = \frac{0,975q + 0,71}{1 - q} = \frac{\beta}{1 - q}.$$

Залежність цього параметра від q показана в правому верхньому куті номограми. При цьому для паротурбінних установок (ТУ) коефіцієнт зменшення потужності β приймався рівним 1 у всьому діапазоні зміни q (штрихова лінія), в той же час для дизельних установок (ДУ) в діапазоні від 0,05 до 0,30 коефіцієнт β визначався за формулою (6), а при $q \geq 0,30$ він також приймався рівним 1 (див. рис. 1, суцільна лінія).

У лівому верхньому квадраті показано залежність допоміжного параметра B , який об'єднує вплив паливної складової та вантажомісткості, та A

$$B = P_w \cdot A.$$

Значення P_w приймалось рівним 25, 75 та 125 тис. м³.

В лівому середньому квадраті приводиться залежність

$$C = \eta_e \cdot B.$$

Для двох крайніх значень $\eta_e = 0,30$ та $0,40$, в правому середньому квадраті залежність

$$D = \alpha \cdot C,$$

для значень $\alpha = 0,001; 0,002; 0,003$.

В правому нижньому квадраті показано залежність ефективної потужності головного двигуна N_e від нижчої теплоти згоряння газу

$$N_e = 0,00725 Q_{\text{н}} D \quad (8)$$

При цьому параметр $Q_{\text{н}}$ приймався рівним 21000 кДж/м³ (для природного газу із значним вмістом азоту), 29400 кДж/м³ (для газу з помірним вмістом азоту) та 37600 кДж/м³ (для газу із збільшеним вмістом азоту) та 37600 кДж/м³ (для газу із збільшеним вмістом азоту).

Не важко помітити, якщо підставивши значення D , C , B , A в формулу (8), то отримаємо вихідну формулу (7) для визначення N_e .

Номограма дозволяє графічно прослідкувати ланцюжок залежностей від будь-якого початкового параметра до шуканої потужності. Додатково, у лівому нижньому куті наведено діаграму, що пов'язує потужність N_e з експлуатаційною швидкістю V_s для трьох значень P_w , що дає змогу оцінити вплив потужності на ходові якості судна.

Валідацію методики та номограми проведено на прикладі судна-метановоза «Venator» ($P_w = 26$ тис. м³ зі швидкістю ходу 21 вузол). За умови максимальної розрахункової норми випаровування ($\alpha = 0,003$) та використання газу з помірним вмістом азоту ($Q_{\text{н}} = 29400$ кДж/м³) для досягнення паспортної потужності ГД 15 МВт (Sulzer RND-90M) за номограмою знайдено необхідну частку теплоти від рідкого

палива $q \approx 0,52$. Це значення узгоджується з реальними експлуатаційними даними, що підтверджує практичну придатність розробленого інструменту. Номограма також дозволяє розв'язувати обернені задачі, наприклад, визначати максимально доступну потужність при фіксованому значенні q (наприклад, мінімальному для екологічного режиму).

ВИСНОВКИ

Ефективна потужність та експлуатаційна стабільність головних двопаливних двигунів сучасних метановозів знаходяться в прямій залежності від динаміки утворення та можливостей утилізації випарованого газу (BOG). Рациональне керування цими взаємопов'язаними процесами дозволяє не лише мінімізувати втрати дорогоцінного вантажу, але й суттєво підвищити паливну економічність судна в цілому, забезпечуючи дотримання сучасних строгих екологічних (IMO Tier III) та техніко-економічних стандартів.

Розроблена аналітична методика та побудована на її основі універсальна номограма забезпечують швидку та наочну оцінку ефективної потужності головних двигунів N_e як функції змінних q , P_w , η_e , α , $Q_{\text{н}}$ та g_{el} . Графоаналітичний підхід дозволяє апроксимувати складну багатовимірну залежність у зручному двовимірному полі, де сімейства кривих виконують роль алгебраїчних функцій, що значно спрощує інженерні розрахунки на етапах попереднього проектування та експлуатаційного аналізу.

Практична апробація методики на реальних даних метановоза «Venator» з головним двигуном Sulzer RND-90M потужністю 15 МВт підтвердила її адекватність. Розрахункове значення частки теплоти від рідкого палива ($q \approx 0,52$), отримане з номограми для граничних умов по BOG, достовірно відповідає експлуатаційним характеристикам судна.

Запропонований підхід є ефективним інструментом для оптимізації як проектування нових LNG-танкерів (вибір потужності ГЕУ, узгодження з параметрами танків та системи управління BOG), так і експлуатації існуючих суден (вибір оптимального паливного режиму залежно від складу газу, кліматичних умов та необхідної швидкості).

Для повного відображення сучасних реалій методика потребує подальшого розвитку та адаптації. Необхідно врахувати специфічні характеристики нових поколінь двотактних двопаливних двигунів (таких як MAN B&W ME-GI або WinGD X-DF), зокрема їхні характеристики стійкості до детонації, можливість роботи при дуже низьких значеннях q (менше 1%), а також інтеграцію з передовими системами управління BOG, включаючи економічні та ефективні установки (LPG reliquefaction plant), які змінюють баланс паливних потоків на борту [6].

REFERENCES

- [1] Diachenko, T. V. (2017). *Transportuvannya ta zberezhennia zridzhenoho pryrodnoho hazu: navchalnyi posibnyk* [Transportation and storage of liquefied natural gas: a training manual]. Odesa : Osvita Ukrainy. 106 p. [in Ukrainian].
- [2] Martins, M., & Teixeira, A. (2018). Propulsive power prediction for large LNG carriers considering hull resistance and propeller efficiency. *Ocean Engineering*, 156, 331–343.
- [3] Shin, Y., & Seo, K. (2020). Voyage based power requirement mapping for LNG carriers under sea state variability. *Marine Structures*, 73, 102809.
- [4] United Nations Conference on Trade and Development. (2021). Review of maritime transport 2021. United Nations.
- [5] Nalivayko, V. S., Tymoshevskiy, B. H., & Tkachenko, S. H. (2015). *Sudnovi dvyhuny vnutrishnyoho zghoriannia* [Marine internal combustion engines]. [Textbook]. 332 p. [in Ukrainian].
- [6] Yao, H., Wang, X., Li, Q., et al. (2020). Performance analysis of ME GI dual fuel low speed engines under variable boil off gas supply on LNG carriers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 889.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дьяченко, Т. В. (2017). *Транспортування та збереження зрідженого природного газу: навчальний посібник*. Одеса : Освіта України. 106 с.
- [2] Martins, M., & Teixeira, A. (2018). Propulsive power prediction for large LNG carriers considering hull resistance and propeller efficiency. *Ocean Engineering*, 156, 331–343.
- [3] Shin, Y., & Seo, K. (2020). Voyage based power requirement mapping for LNG carriers under sea state variability. *Marine Structures*, 73, 102809.
- [4] United Nations Conference on Trade and Development. (2021). Review of maritime transport 2021. United Nations.
- [5] Наливайко, В. С. Тимошевський, Б. Г. & Ткаченко, С. Г. (2015). *Суднові двигуни внутрішнього згоряння : підруч. для студентів ВНЗ*. Миколаїв : Торубара В. В. [вид.]. С. 331.
- [6] Yao, H., Wang, X., Li, Q., et al. (2020). Performance analysis of ME GI dual fuel low speed engines under variable boil off gas supply on LNG carriers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 889.

© Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Авдюнін Р. Ю., Попов О. М.

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)