

УДК 621.431:629.5(075)
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).19](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).19)

RANKING OF ENERGY FUELS BY ENVIRONMENTAL IMPACT

РАНЖУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАЛИВ ПО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Volodymyr P. Shostak
shostakvolodymyr7@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4745-4734
Bohdan M. Lychko
bogdan.lychko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3943-9689

В. П. Шостак,
канд. техн. наук, професор
Б. М. Личко,
канд. техн. наук, доцент

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. The increase in CO₂ emissions resulting from the combustion of hydrocarbons and related substances intensifies the greenhouse effect and negatively impacts the climate. Therefore, it is relevant to search for and apply ways to reduce these emissions, particularly through the rational use of carbonized fuels. The *aim* of the study is to identify and formalize a quantitative indicator that enables the ecological ranking of available fuels at the early stages of project planning and decision-making.

The research *methodology* employed was a systematic approach to identifying the existing problem, analyzing the unresolved aspects of the issue, seeking a new approach to the environmental ranking of energy fuels, and formalizing the degree of their carbonization.

The object of the study is hydrocarbons as fuels and related combustible substances, while the subject is the chemical processes of their combustion involving oxygen.

The *result* is the analytical determination of an indicator that allows for the comparison of major energy fuels in terms of their impact on the greenhouse effect and carbon dioxide emissions. This indicator is the proposed degree of fuel carbonization, for which formulas are provided for both hydrocarbons and other combustible substances whose molecules contain, in addition to carbon and hydrogen, oxygen. Calculating the degree of carbonization enabled the creation of a ranking table for the main modern fuels.

The *scientific novelty* lies in the analysis of the physicochemical processes of combustion of fuels of organic origin, with a focus on the final products of chemical reactions. The practical significance is in preventing the unjustified use of certain fuels, particularly alternative ones, thereby avoiding excessive emissions into the environment.

In addition, it was found that commonly used fuels fall within a relatively narrow range in terms of their impact on the greenhouse effect, which is limited by their degree of carbonization – from 20 % (for methane) to approximately 33 % (for methanol, heavy fuels, etc.).

Key words: hydrocarbons; chemical combustion processes; carbon dioxide; degree of fuel carbonization; carbon; hydrogen; oxygen.

Анотація. Зростання викидів CO₂ внаслідок спалювання вуглеводнів та споріднених речовин поглиблює парниковий ефект і негативно впливає на клімат. Актуальним є пошук та використання шляхів зниження цих викидів, а саме обґрунтованого вживання карбонізованого палива. *Метою дослідження* є виявлення і формалізація кількісного показника, який дозволить розставляти по рангу (в аспекті екології) наявні палива вже на ранніх стадіях прийняття проектних і управлінських рішень.

Використаною *методикою* дослідження став системний підхід до визначення існуючої проблеми, аналіз невирішеної частини проблеми, пошук нового підходу до екологічного ранжування енергетичних палив і формалізація ступеня їх карбонізації.

Об'єктом дослідження є вуглеводні як паливо й близькі до них горючі речовини, а предметом – хімічні процеси їх згоряння з використанням кисню.

Результат полягає в аналітичному визначенні показника, який дозволяє порівнювати між собою основні енергетичні палива по впливу на парниковий ефект, по викидам вуглекислого газу. Таким показником виявилась запропонована ступінь карбонізації палива, для підрахунку якої наведені формули як для вуглеводів, так і для

інших горючих речовин, молекули котрих, крім карбонату та гідрогену, містять кисень. Розрахунок ступеня карбонізації дозволив скласти ранжуючу таблицю для основних сучасних палив.

Наукова новизна складається з аналізу фізико-хімічних процесів горіння палива органічного походження з огляду на кінцевий продукт хімічних реакцій. Практична значимість полягає у запобіганні необґрунтованого використання певного палива, особливо альтернативного, а значить і надлишкових викидів у навколишнє середовище.

Крім того, встановлено, що широко вживані палива по впливу на парниковий ефект знаходяться у відносно вузькому діапазоні, який обмежується їх ступенем карбонізації від 20 % (для метану) до ~ 33 % (для метанолу, важкого палива, тощо).

Ключові слова: вуглеводні; хімічні процеси горіння; вуглекислий газ; ступінь карбонізації палива; карбон; гідроген; кисень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

З плином часу зростає виробництво і використання теплової енергії. Отже зростає видобуток і споживання викопного палива, яке переважно складається з вуглеводнів. Це супроводжується стабільним збільшенням викидів в атмосферу Землі вуглекислого газу. Серед парникових газів саме надлишок вуглекислого газу в атмосфері підвищує глобальну температуру, що є ключовою причиною небажаної зміни клімату [1, 4].

Держави та компанії, після підписання Паризької кліматичної угоди у 2015 році, прагнуть зменшити викиди вуглекислого газу, але щорічно вони збільшуються [5]. Тому актуальним є пошук шляхів зменшення цих викидів. Одним із них є своєчасно оцінка рівня карбонізації можливих до використання палив і робота для цього відповідного показника, що дозволяв би ранжувати їх по впливу на довкілля на ранніх стадіях прийняття рішень.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомі різні способи зниження впливу палива, яке споживають стаціонарні та транспортні енергетичні установи, на навколишнє середовище через викиди вуглекислого газу. В основному це досягається скороченням витрат палива підвищенням коефіцієнта корисної дії та завдяки впровадженню енергозбереження, перш за все шляхом глибокої утилізації відхідної теплоти (Воїнов, Коновалов, Самохвалов, 2022 і Шостак, Кісарова, Манзюк, 2016). Проте у цих роботах відсутні будь-які відомості щодо впливу різних сортів палива на викиди вуглекислого газу; і подібного плану робіт чимало в інформаційному просторі. Також є немало наукових робіт стосовно спалювання традиційних і альтернативних палив в аспекті протікання в них фізико-хімічних процесів. Зокрема, в монографії (Warnatz, Maas & Dibble, 2006) наведені результати досліджень згоряння палива; проте розподіл палив по впливу на довкілля в ній відсутній. Грунтовна наукова стаття (Lu & Law, 2009) також оминає екологічне ранжування палив. Особливої уваги заслуговує змістовний підручник (Єлагін, Тищенко, Алексєєв, Нуязін і Майборода, 2020), в якому з хімічної точки зору наводяться і аналізуються процеси горіння

енергетичних і вибухових палив та підкреслюється їх складність щодо експериментальних та системних досліджень; відносна оцінка палив по виходу діокси-ду вуглецю не наголошується.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Загальна проблема – зменшення негативної, антропогенної діяльності людини на парниковий ефект – розв'язується, можна вважати, в основному за двома напрямками: зменшення витрат палива шляхом підвищення термодинамічної ефективності енергетичних об'єктів та декарбонізація палива. Що ж стосується оперативної екологічної оцінки видів палива, можливих для застосування на даний час, то це практично відсутнє. Огляд літератури у цьому аспекті вказує на недостатню увагу до екологічного ранжування енергетичних палив. Ліквідація такої прогалини сприятиме вирішенню вказаної загальної проблеми.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Проаналізувати процеси згоряння вуглеводнів і близьких до них горючих речовин, з огляду на кінцевий продукт хімічних реакцій, і на підставі цього формалізувати та запропонувати кількісний показник, який дозволить оперативно оцінювати вплив різних палив на парниковий ефект

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами дослідження обрано системний підхід до визначення існуючої проблеми, аналіз не вирішеної частини проблеми, пошук нового підходу до екологічного ранжування енергетичних палив і формалізація ступеня їх карбонізації. Об'єктом дослідження є вуглеводні як паливо й близькі до них горючі речовини, а предметом – хімічні процеси згоряння та ступінь їх карбонізації.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Серед енергетичних палив домінують вуглеводні – продукти переробки нафти та природний газ метан, для спалювання яких зазвичай використовується повітря. Як відомо, саме кисень повітря, в якому його вміст становить ~ 21 %, забезпечує горіння

палива, тобто хімічну взаємодію його зі складовими вуглеводнів – вуглецем і воднем. Основними продуктами згоряння є вуглекислий газ і вода, які відводяться в навколишнє середовище, підсилюючи парниковий ефект, що, на думку багатьох, вважається негативом людської діяльності. Саме надлишок парникових газів в атмосфері Землі призводить до зміни клімату, наслідки якої спостерігаються наразі у вигляді масштабних пожеж, сильних повеней чи посух по всьому світу [1, 2].

До основних парникових газів, як вказують фахівці екологічного спрямування, відносяться пари води (H_2O), вуглекислий газ (CO_2), а також озон (O_3), оксиди азоту (NO_x), метан (CH_4) та хлорфлуоровуглеводні. Ці гази здатні поглинати інфрачервоне випромінювання, що спричиняє підсилення парникового ефекту та підвищення середньої температури на планеті [5]. Водяна пара є основним природним парниковим газом, який відповідальний за 36–72 % загального парникового ефекту, а вуглекислий газ – 9–26 %, метан – 4–9 %, решта – в незначній мірі. Підвищення вологості сприяє зростанню хмарності, а хмари відбивають пряме сонячне світло, тим самим збільшуючи альбедо Землі. Це призводить до антипарникового ефекту, дещо зменшуючи кількість сонячного випромінювання до поверхні Землі і денний прогрів нижніх шарів атмосфери [4]. Це дає підставу фахівцям вважати, що вплив викидів водяної пари при згорянні палива нейтральний щодо підсилення парникового ефекту. Отож, вирішальну роль по впливу на довкілля використання палива відіграє саме вуглекислий газ. Тому якість палива, з екологічної точки зору, може оцінюватися часткою вуглецю у молекулах вуглеводнів. Очевидно, чим менше вуглецю, тим якісніше паливо.

Для ранжування палив необхіден кількісний показник. У зв'язку з цим розглянемо основні процеси згоряння вуглеводнів та інших горючих речовин.

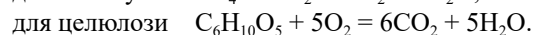
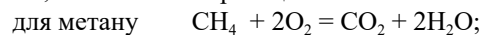
Спрощене уявлення про спалювання горючих речовин панує нерідко в інженерній практиці і, що вкрай недоречно, серед осіб, долучених до прийняття конструкторських і управлінських рішень. Воно зводиться до того, що горіння – це фізико-хімічний процес, який характеризується швидким екзотермічним окисленням горючої речовини окислювачем, зазвичай киснем, що супроводжується виділенням теплової та світлової (променевої) енергії. Механізм горіння включає кілька етапів, починаючи з нагрівання горючої речовини до температури займання та закінчуючи реакціями в газовій фазі.

Як відмічають автори джерела [3], незважаючи на великий досвід використання на практиці, процес горіння залишається одним з найскладніших для наукового вивчення. Зокрема, дані про швидкості елементарних реакцій поки що не можуть бути отримані в експерименті або розраховані.

З огляду на мету даного дослідження, розглядатимемо процес горіння, виходячи із кінцевого продукту спалювання чистих, без домішок, вуглеводнів і деяких близьких за складом горючих речовин.

При повному згорянні кінцевими продуктами є вуглекислий газ CO_2 і вода H_2O . Вважаємо, що в його основі лежить хімічна реакція між *атомами* вуглецю, водню та кисню, тобто між карбоном, гідрогеном і киснем. Таким чином, паливо й кисень спочатку повинні дисоціюватися на атоми. Це ендотермічна хімічна реакція, яка, за визначенням, супроводжується поглинанням теплової енергії. Реакція окислення киснем карбону та гідрогену – це екзотермічна реакція, а виділена при цьому тепла енергія перевищує теплоту, потрібну для дисоціації. Початкова дисоціація відбувається за рахунок зовнішнього джерела теплоти. Виходячи з цього на рис. 1.а показано протікання згоряння метану («чистого» вуглеводня CH_4), а на рис. 1.б – целюлози, молекула якої, крім карбону та водню, має кисень $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$.

При повному спалюванні, при достатній кількості кисню, окислювальні реакції такі:



Спочатку до суміші палива з окислювачем (киснем) підводиться ззовні теплота дисоціації відповідно палива $q_{\text{дп}}$ і $q_{\text{до}}$, завдяки якій утворюються атоми вуглецю С, водню Н та кисню О як слідство розпаду молекул метану CH_4 (рис. 1.а), целюлози $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ (рис. 1.б) та кисню O_2 . Розпад здійснюється завдяки поглинанню теплової енергії, тобто це ендотермічна реакція. Атоми (карбон, гідроген і кисень) вступають в хімічну взаємодію, реакція екзотермічна; виділяється тепла енергія згоряння Q_3 . Частка цієї енергії йде на дисоціацію наступних молекул палива й кисню у кількості $q_{\text{дп}} + q_{\text{до}}$; це внутрішня енергія для продовження горіння, так що зовнішня енергія більше не потрібна. Корисна тепла енергія, заради якої здійснюється спалювання горючої речовини, становить $Q_k = Q_3 - (q_{\text{дп}} + q_{\text{до}})$.

При спалюванні метану усі його атоми дали користь. Інша річ, коли спалюється целюлоза, молекула якої крім карбону та гідрогену, містить кисень. Дисоціація целюлози дала атоми С, Н і О, з яких атоми вуглецю вступили в реакцію з атомами «зовнішнього» кисню, а атоми водню – з атомами «внутрішнього» кисню. Молекула целюлози складніша за молекулу метану, так що можна *припустити*, що на її дисоціацію потребується більша енергія. І це збільшення (по відношенню до метану) компенсується теплотою, що виділилась в реакції між «внутрішніми» атомами кисню і водню. Корисна теплота від целюлози – тільки від вуглецю, а від метану – ще й від водню. Це підтверджується тим, що нижча теплота згоряння метану набагато більша ніж целюлози. Отже, є підстави вважати, що кисень, а в даному випадку, і водень

у целюлозі, як в паливі, являються баластом. Наведені вище припущення також доречні – запалювання целюлози потребує більше енергії ніж спалювання метану.

Енергетичні палива, а також і інші горючі речовини містять у молекулі різну кількість атомів вуглецю. Для більшості вживаних палив ступінь їх карбонізації (по відношенню до водню, у %), отже і вплив їх на довкілля з огляду на викладене вище, може бути розрахований за наступною формулою:

$$\bar{C} = \frac{n_C}{n_C + n_H + 2n_O} \cdot 100 \%,$$

де n_C , n_H , n_O – кількість атомів відповідно вуглецю, водню і кисню у молекулі палива.

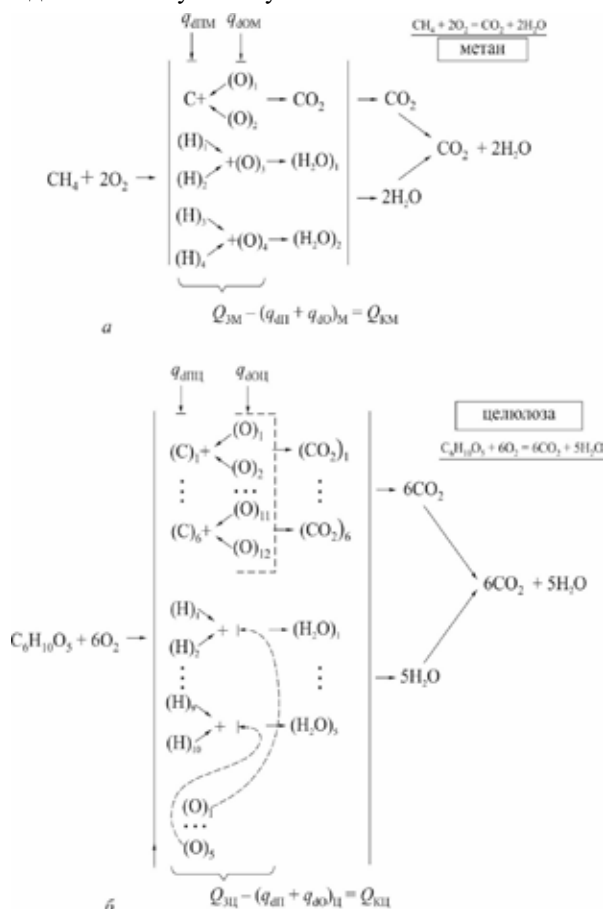


Рис. 1. Структурна схема згоряння палива:
а – метану, б – целюлози (деревини зневодненої)

Ступінь карбонізації енергетичного палива – це відношення кількості карбонів в його молекулі до кількості в ній «горючих» смолів, що вступають в хімічну взаємодію з киснем, який додається для згоряння. Для вуглеводнів горючі атоми – це карбон і гідроген.

Середня ступінь карбонізації палива, яке складається з суміші різних вуглеводнів (що визначається загальною формулою C_nH_{2n+2}) і для якого відомий діапазон кількості атомів вуглецю $n_C^{min} \dots n_C^{max}$ в їх молекулах, розраховується за наступною формулою:

$$\bar{C}_{cp} = \left(\frac{n_C^{min}}{(n_C + n_O)^{min}} + \frac{n_C^{max}}{(n_C + n_O)^{max}} \right) \frac{1}{2} \cdot 100 \, \%.$$

Наприклад, для таких горючих речовин як дизельне паливо – $C_{10}H_{22} \dots C_{18}H_{38}$, нафта – $C_2H_6 \dots C_{70}H_{142}$ і мазут $C_{20}H_{42} \dots C_{70}H_{142}$ розрахована середня ступінь карбонізації складає відповідно $\bar{C}_{дп} = 31,7 \, \%$, $\bar{C}_H = 29,8 \, \%$ і $\bar{C}_M = 33,15 \, \%$.

Важке паливо виготовляється за складною технологією (залежно від виробника), але є спільним і основним те, що до мазуту додають деяку кількість дизельного палива та ретельно перемішують; його частка становить $\xi = 0,02 \dots 0,06$. У цьому випадку середня ступінь карбонізації розраховується як

$$\bar{C}_{вп} = \xi \bar{C}_{дп} + (1 - \xi) \bar{C}_M;$$

при $\xi = 0,05$ $\bar{C}_{вп} = 40,35 \, \%$.

У таблиці 1 для характерних видів палива наведено склад молекул і розрахований за вказаними вище формулами їх ступінь карбонізації. Крім вуглеводнів, для порівняння вказано ступінь карбонізації для водню, антрациту та целюлози (зневодненої деревини). Для нафти, дизельного й важкого палива та мазуту, які являють собою суміш різних вуглеводнів, наведено середня ступінь карбонізації.

На рис. 2 дана наочна інтерпретація ступеня карбонізації окремих палив. Широко вживані палива по впливу на парниковий ефект знаходяться у відносно вузькому діапазоні, який обмежується ступенем карбонізації від 20 до 33 %. Можливо, цим пояснюється, що основні положення та прагнення Паризької кліматичної угоди 2015 року щодо декарбонізації не підтверджуються відповідними діями, і викиди CO_2 збільшуються щорічно.

Таблиця 1. Ступінь карбонізації горючих речовин

Паливо	Формула	$\bar{C}$
Водень	H_2	0
Метан	CH_4	20
Етан	C_2H_6	25
Пропан	C_3H_8	27
Бутан	C_4H_{10}	29
Високооктановий бензин AI-92, AI-95, AI-98	C_8H_{18}	31
Нафта (очищена)	C_nH_{2n+2}	29
Дизельне паливо	$C_{10}H_{22} \dots C_{18}H_{38}$	31,7
Метанол	CH_3OH	33
Етиловий спирт	C_2H_6O	33
Важке паливо	$0,05 \bar{C}_{дп} + 0,95 \bar{C}_M$	33,08
Мазут	$C_{20}H_{42} \dots C_{70}H_{142}$	33,15
Ацетилен, бензин	C_2H_2, C_6H_6	50
Вугілля – антрацит	95 % – C; 5 % – домішки	99
Деревина зневоднена	$C_6H_{10}O_5$	100

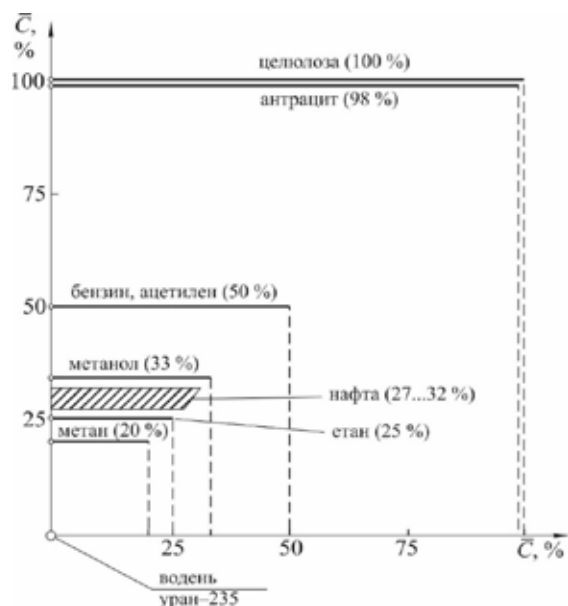


Рис. 2. Ступінь карбонізації деяких видів палива (по відношенню до водню)

У таблиці енергетичні палива розташовані по рангу, по ступеню впливу на довкілля. Якщо вважати, що вплив викидів водяної пари на парниковий ефект компенсується підвищеною хмарністю, яка зменшує дію сонячних променів на земну поверхню, то ранжуючу таблицю очолює водень, а замикає її деревина та вугілля.

В енергетиці до палива відноситься і уран-235, який є паливом до енергетичних атомних реакторів. Його застосування, до речі, не дає викидів як вуглекислого газу, так і водяної пари. Хоча при використанні градієнтів викиди водяної пари мають місце.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Виявлення й формалізація кількісного показника – ступеня карбонізації енергетичного палива

безумовно є актуальним, оскільки він дозволяє розставити по рангу сучасні палива і співставляти їх по впливу на парниковий ефект між собою та воднем й ураном-235 (ступінь карбонізації останніх нульовий), а також з антрацитом і зневодненою деревиною, карбонізація яких біля 100 %.

В різних виробничих ситуаціях та енергетичних об'єктах застосовуються низка тих чи інших палив, змінюється в часі цінова політика, так що доречним в прийнятті рішень безумовно може слугувати запропонований кількісний показник – ступінь карбонізації палива, який легко вираховується.

Наведена таблиця ступеня карбонізації горючих речовин вказує ранг впливу того чи іншого палива на парниковий ефект; ця ступінь карбонізації може слугувати критерієм вибору із наявних до використання палив.

Природно, що отримані результати не є вичерпними в рамках загальної екологічної проблеми, а для підвищення якості таких результатів потрібні поглиблені дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Використання показника карбонізації палива сприятиме доцільному застосуванню того чи іншого палива вже на стадії прийняття проектних рішень стосовно енергетичних об'єктів.

2. З огляду на проблему декарбонізації різниця між вуглеводнями (природним газом, нафтою, нафтопродуктами) не така вже й суттєва: ступінь їх карбонізації лежить у межах 20–33 %, за винятком ацетилену та низькоякісного бензину, де вона сягає 50 %.

3. Зменшення вуглекислого газу в атмосфері Землі, що на думку багатьох вважається доцільним, лежить через широке впровадження в антропогену енергетичну діяльність людини ядерної енергетики, електричний струм від якої, до речі, дозволить одержувати дешевий водень як безкарбонне паливо.

REFERENCES

- [1] Basok, B. I., & Vaziev, Ye. T. (2019). Enerhetychna stratehiia v realiiakh suchasnoho svitu (ohliad) [Energy Strategy in the Realities of the Modern World (Review)]. *Teplofizyka ta Teploenerhetyka – Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 34–42. [in Ukrainian].
- [2] Voinov, O. P., Kononov, D. V., & Samokhvalov, V. S. (2022). Enerhetychni obiekty morskoi infrastruktury v formuvannia ekolohichnoi obstanovky [Energy Objects of Marine Infrastructure in the Formation of the Ecological Situation]. In *Enerhiia. Biznes. Komfort: materialy rehionalnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 16 hrudnia 2021 r. [Energy. Business. Comfort: materials of the regional scientific and practical conference, December 16, 2021] (pp. 4–8). ONAKhT. [in Ukrainian].
- [3] Yelagin, H. I., Tyshchenko, Ye. O., Aleksiev, A. H., Nuyanzin, V. M., & Mayboroda, A. O. (2020). Vyynyknennia i rozvytok horinnia ta vybuchu. Prypynennia horinnia [The Origin and Development of Combustion and Explosion. Termination of Combustion]: Textbook. Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chornobyl. NUSCU of Ukraine. [in Ukrainian].
- [4] Parnykovi hazy [Greenhouse gases]. (n.d.). In *Wikipedia – Wikipedia*. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org> [in Ukrainian].
- [5] Parnykovi hazy [Greenhouse gases]. (n.d.). In *Velyka ukrainska entsyklopediia – Great Ukrainian Encyclopedia*. Retrieved from <https://vue.gov.ua> [in Ukrainian].
- [6] Shostak, V. P., Kisarova, A. I., & Manziuk, A. Yu. (2016). Ekolohiia i sudnova enerhetyka [Ecology and Ship Power Engineering]. In *Zberechemo dlia nashchadkiv: Materialy IX Mykolaivskykh miskykh ekolohichnykh chytan* [Let's preserve for descendants: Materials of the IX Mykolaiv city ecological readings] (100 p.). [in Ukrainian].

- [7] Lu, T.F., Law, C.K. (2009). Toward accommodating realistic fuel chemistry in large-scale computations. *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier. T. 35. № 2. P. 192–215. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.10.002.
- [8] Pathways to zerocarbon shipping by 2035. (2018). *Decarbonising Maritime Transport: Case-specific policy analysis. International Transport Forum*, pp. 1–86. Retrieved from: https://www.jotun.com/ww-en/industries/shipping?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign={{campaign.name}}&utm_term={{paid.keyword}}&gclid=Cj0KCQjw0vWnBhC6ARIsAJpJM6e_a1SPR1hH361yRR31_kVedUefJSOZJ77AX9RiMRuDLfw5AkDJNEaArgfEALw_wcB
- [9] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006). *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Pollutant Formation*. Springer. 378 p. ISBN: 978-3540453635.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Басок, Б.І., Вазєєв, Є.Т. (2019). Енергетична стратегія в реаліях сучасного світу (огляд). *Теплофізика та теплоенергетика*. Т.41. №1. С. 34–42.
- [2] Воїнов, О.П. Коновалов, Д.В., Самохвалов, В.С. (2022). Енергетичні об'єкти морської інфраструктури в формування екологічної обстановки. *Енергія. Бізнес. Комфорт: матеріали регіональної науково-практичної конференції*, 16 грудня 2021 р. Одеса: ОНАХТ. С. 4–8.
- [3] Слагін, Г.І., Тищенко, Є.О., Алексєєв, А.Г., Нуянзін, В.М., Майборода, А.О. (2020). Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння: *підручник*. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. НУЦЗ України. 434 с.
- [4] Парникові гази. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org>
- [5] Парникові гази: *ВУЕ*. URL: <https://vue.gov.ua>
- [6] Шостак, В.П., Кісарова, А.І., Манзюк, А.Ю. (2016). Екологія і суднова енергетика. *Збережемо для нащадків: Матеріали IX Миколаївських міських екологічних читань*. Миколаїв. 100 с.
- [7] Lu, T.F., Law, C.K. (2009). Toward accommodating realistic fuel chemistry in large-scale computations. *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier. T. 35. № 2. P. 192–215. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.10.002.
- [8] Pathways to zerocarbon shipping by 2035. (2018). *Decarbonising Maritime Transport: Case-specific policy analysis. International Transport Forum*. PP. 1–86. URL: https://www.jotun.com/ww-en/industries/shipping?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign={{campaign.name}}&utm_term={{paid.keyword}}&gclid=Cj0KCQjw0vWnBhC6ARIsAJpJM6e_a1SPR1hH361yRR31_kVedUefJSOZJ77AX9RiMRuDLfw5AkDJNEaArgfEALw_wcB
- [9] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R.W. (2006). *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Pollutant Formation*. Springer. 378 p. ISBN 978-3540453635.

© Шостак В. П., Личко Б. М.

Дата надходження статті до редакції: 08.06.2025

Дата затвердження статті до друку: 25.06.2025