

---

## Аналіз перспектив використання біопалив на морському транспорті

**Тетяна Железна**

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

ORCID 0000-0002-9607-3022

**Семен Драгнєв**

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

ORCID 0000-0003-3754-4186

### Для цитування цієї статті:

Железна Тетяна, Драгнєв Семен. Аналіз перспектив використання біопалив на морському транспорті. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No.6, 2024, pp. 75-87. doi: 10.46299/j.isjea.20240306.07.

**Надійшла до редакції:** 11 листопада 2024 р.; **Схвалено:** 30 листопада 2024 р.;

**Опубліковано:** 01 грудня 2024 р.

---

**Анотація:** Проаналізовано перспективи використання біопалив як заміника традиційних суднових палив. Актуальність питання пов'язана з тим, що запровадження альтернативних палив, у тому числі біопалив, є можливим шляхом для скорочення викидів парникових газів і виконання вимог Міжнародної морської організації щодо обов'язкового використання палив з низьким вмістом сірки. Серед біопалив для потенційного заміщення традиційних суднових палив зазвичай розглядають біодизель, гідроочищену рослинну олію, пряму рослинну олію, скраплений біометан. Перспективним напрямком також є використання біонафти швидкого піролізу, особливо після її додаткової обробки з метою підвищення якості і покращення паливних характеристик. Проведено комплексний порівняльний аналіз різних видів біопалив, що можуть використовуватися на морському транспорті. Виконано ранжування біопалив за перспективністю, першочерговістю та доцільністю їх застосування як заміника традиційних морських палив для умов України. Оцінювався як поточний рейтинг, так і майбутній з фокусом на середньострокову перспективу у 10-15 років, що дало можливість сформулювати сумарний рейтинг для кожного виду біопалива. Зроблено висновок, що для України у середньостроковій перспективі доцільним видається виробництво і використання на водному транспорті біометану, біодизеля і гідроочищеної рослинної олії. Піролізна біонафта також є перспективним біопаливом, яке потребує додаткових досліджень і експериментальних випробувань у суднових двигунах. Такі роботи заплановані до виконання у міжнародному проєкті SEAFAIRER програми Horizon Europe, який розпочався у вересні 2024 року. Автори статті є учасниками проєкту SEAFAIRER з боку України.

**Ключові слова:** декарбонізація, відновлювана енергія, біопаливо, альтернативне паливо, морський транспорт.

---

### 1. Вступ

Сектор транспорту сьогодні є відповідальним за більш ніж 30% кінцевого споживання енергії у світі. Основним споживачем сектору є дорожній транспорт (77% всієї енергії на транспорті), тоді як морський використовує лише близько 10%, що еквівалентно майже 13 ЕДж/рік. Викопне паливо поки залишається основним енергоносієм у всіх секторах транспорту. Найбільша частка відновлюваної енергії (15% у 2021 р.) використовується

залізничним транспортом, а найменша – авіацією (практично 0%) і морським транспортом (0,2%) [1] (таблиця 1).

**Таблиця 1.** Структура кінцевого споживання енергії секторами транспорту у світі і частка використання відновлюваної енергії в них (2021 р.) [1].

Види транспорту	Загальне кінцеве споживання енергії, %	Споживання відновлюваної енергії, %
Дорожній	77	4,6
Морський	9,7	0,2
Авіаційний	8,2	0,0
Трубопровідний	2,5	1,3
Залізничний	2,1	15,0
Інші	0,3	6,0

Транспорт вважається сектором, який важко піддається декарбонізації. Європейський Союз приділяє особливу увагу цьому питанню, у тому числі стосовно морського транспорту. У 2023 р. в ЄС було прийнято Регламент по використанню відновлюваних і низьковуглецевих палив на морському транспорті – FuelEU Maritime [2]. Цей законодавчий документ встановив обмеження для середньорічної інтенсивності парникових газів (ПГ) енергоносіїв, які споживаються будь-якими суднами валовою місткістю понад 5000 тонн, що заходять до європейських портів. Встановлені ліміти мають забезпечити поступове зменшення інтенсивності викидів ПГ палива на морському транспорті порівняно з базовим значенням 91,16 г CO<sub>2-екв</sub>/МДж. Передбачувана динаміка скорочення – від 2% з 2025 р. до 80% з 2050 р. Очікується, що виконання цих цілей стимулюватиме перехід морського транспорту з викопних на відновлювані та низьковуглецеві палива. Цілі по скороченню емісії охоплюють викиди не лише CO<sub>2</sub>, а й метану та закису азоту протягом повного життєвого циклу палив, що споживаються на борту судна. Регламент FuelEU Maritime набуває чинності 01.01.2025, окрім двох статей стосовно розробки і вдосконалення планів моніторингу викидів ПГ, що є чинними з 31.08.2024.

Важливим фактором є те, що з 2024 р. морський транспорт увійшов до сфери охоплення системи торгівлі квотами на викиди парникових газів ЄС (СТВ ЄС). На даний момент це стосується тільки емісії CO<sub>2</sub>: 50% викидів від рейсів, що починаються в Євросоюзі, а закінчуються поза ним; 50% викидів від рейсів, що починаються поза ЄС, а закінчуються в ЄС; 100% викидів від рейсів між двома портами ЄС і коли судна знаходяться в портах Євросоюзу. З 01.01.2026 СТВ ЄС охоплюватиме також викиди метану і закису азоту на морському транспорті [3].

Основними видами палива комерційного морського транспорту у світі зараз є суднове дизельне паливо (MDO), флотський мазут (IFO) і судновий газойль (MGO). Альтернативними паливами і енергоносіями для морського транспорту можуть бути метанол, скраплений природний газ (LNG), зріджений нафтовий газ (LPG), біопалива, аміак, водень, електроенергія.

Для оцінки викидів CO<sub>2</sub> від різних видів палив водного транспорту Міжнародна морська організація (ІМО) використовує коефіцієнт утворення вуглецю (C<sub>F</sub>), який показує скільки грамів CO<sub>2</sub> утворюються при використанні 1 г відповідного типу палива. В таблиці 2 наведено значення C<sub>F</sub> для вибраних палив. Коефіцієнт викидів для мазуту з низьким вмістом сірки приймається таким же, як і для звичайного мазуту (HFO).

Серед біопалив для потенційного заміщення традиційних суднових палив зазвичай розглядають біодизель (метилові естери жирних кислот – FAME), гідроочищену рослинну олію (HVO), пряму (тобто необроблену) рослинну олію (SVO), скраплений біометан, біонафту швидкого піролізу. Часто вартість рідких біопалив, особливо II покоління (передових), вище

вартості їх викопних «аналогів». Це є одним з факторів, що поки стримує широкий перехід транспорту на біопалива.

**Таблиця 2.** Значення коефіцієнту утворення вуглецю різних палив для водного транспорту з бази даних ІМО [4].

Тип палива	Коефіцієнт утворення вуглецю ( $C_F$ )
Дизельне паливо (ДП) / Газойль	3,206
Легкий мазут (LFO)	3,151
Мазут (HFO)	3,114
Зріджений нафтовий газ (LPG) – Пропан	3,000
Зріджений нафтовий газ (LPG) – Бутан	3,030
Скраплений природний газ (LNG)	2,750
Метанол	1,375
Етан	2,927
Етанол	1,913

За оцінками експертів британської компанії Longspur Capital, конкурентоспроможність традиційного нафтового палива на морському транспорті поступово знижується, а альтернативних палив, навпаки, росте. Це пов'язано із реалізацією відповідних міжнародних програм і запровадженням нових екологічних податків. Очікується, що вже у 2025 р. вартість більш екологічних видів палива може стати нижчою, ніж традиційного дизпалива. Таким чином, стане вигідніше використовувати такі альтернативні палива як синтетичний метанол, біометан, біодизель і зелений водень. Прогнозована вартість деяких видів палива у 2025 р. наступна: скраплений природний газ – 92 євро/МВт·год, метанол – 244 євро/МВт·год, паливо зі зниженим вмістом сірки – 130 євро/МВт·год [5].

Регламентом Міжнародної морської організації 2020 року (ІМО 2020) встановлено, що з 2020 р. морські судна повинні використовувати палива з вмістом сірки менше 0,50%, тоді як раніше дозволявся ліміт у 3,5%. Більш того, деякі країни вимагають споживання палив з вмістом сірки  $\leq 0,10\%$  у певних Зонах контролю викидів сірки [6, 7]. Для виконання вимог Регламенту ІМО 2020 власники суден можуть застосовувати різні заходи, наприклад, встановити скрубери, використовувати такі палива як мазут із дуже низьким вмістом сірки (VLSFO), судовий газойль (MGO) або СПГ. Іншим варіантом є перехід на біопалива з низьким вмістом сірки.

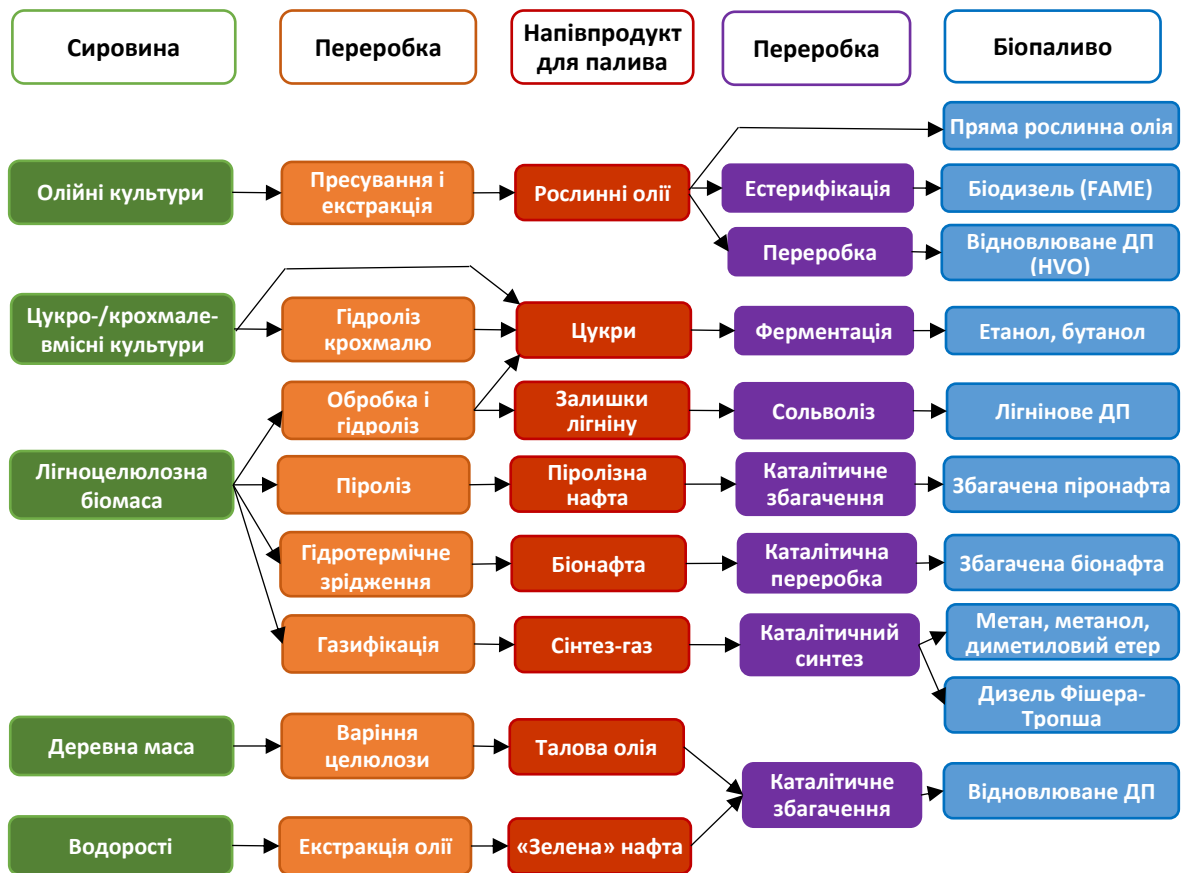
Таким чином, біопалива є перспективною альтернативою традиційним судовим паливам з точки зору декарбонізації морського транспорту, скорочення викидів оксидів сірки й інших шкідливих речовин, а також реалізації загального «зеленого» переходу.

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є рідкі та газоподібні біопалива, що можуть використовуватися на морському транспорті. Такі біопалива виробляються з різних видів біомасової сировини (олійна, цукро-/крохмаловмісна, лігноцелюозна та ін.) різними технологіями конверсії (естерифікація, гідроліз, ферментація, піроліз та ін.) (рис. 1). З певних видів сировини (наприклад, лігноцелюозна біомаса, гній тварин, біомасова фракція відходів) можна отримати біопалива II покоління (передові). Перелік таких видів сировини наведено в частині А додатку IX Директиви ЄС з відновлюваної енергетики (RED III) [8].

Предметом дослідження є характеристики біопалив, які визначають ступінь їх придатності як судових палив, масштаб та перспективи заміщення традиційних морських палив. Такими характеристиками є фізичні, паливні й екологічні властивості біопалив, а також наявність відповідної сировинної бази, сталість біомасової сировини та деякі інші.

На сьогодні недостатньо робіт з порівняльного аналізу рідких біопалив, особливо II покоління, як потенційного палива для морського транспорту для умов України.



**Рисунок 1.** Напрямки конверсії біомасової сировини у біопалива I та II покоління для морського транспорту [9].

### 3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначити види біопалив, які у коротко- та середньостроковій перспективі мають найбільший потенціал для запровадження на морському транспорті, в першу чергу, для умов України.

Задачі дослідження:

1. Провести комплексний порівняльний аналіз різних видів біопалив, що можуть використовуватися на морському транспорті.
2. При аналізі зробити акцент на передові рідкі біопалива, зокрема біонафту від швидкого піролізу лігноцелюлозної біомаси.
3. Виконати ранжування біопалив за перспективністю, першочерговістю та доцільністю їх застосування як заміника традиційних морських палив.

### 4. Аналіз літератури

Питанню використання альтернативних палив і енергоносіїв на морському транспорті вже присвячено чимало досліджень у світі. Так, у звіті Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) 2017 року [10] виконано огляд різних технологій конверсії для отримання біопалив, які можуть бути альтернативою традиційним паливам у секторі морського транспорту. Наведено перелік і характеристику компаній, які вже виробляють такі біопалива. У пізнішому звіті МЕА

2021 року [9] увагу сконцентровано на бар'єрах на шляху запровадження передових рідких біопалив на морському транспорті. Серед основних бар'єрів зазначено високу вартість біопалив і потенційну конкуренцію за споживання з дорожнім транспортом і авіацією.

Можливості і пріоритетність потенційного застосування альтернативних палив на водному транспорті розглянуто в роботах [11, 12]. Проаналізовано такі види палива як скраплений природний газ, метанол, аміак, водень, а також біопалива, зокрема, біодизель, гідроочищена рослинна олія, пряма рослинна олія, зріджений біометан. Розглянуто потенціал різних заходів, у тому числі запровадження альтернативних палив, для декарбонізації судноплавства. Показано, що для альтернативних палив і носіїв цей потенціал є найбільшим.

В дослідженні [13] біонафту від швидкого піролізу целюлозної сировини визначено як перспективний вид альтернативного палива для морського транспорту. Однак, для безпосереднього застосування біонафту потребує додаткової обробки для підвищення її якості. Згідно результатів дослідження [14], одним з варіантів може бути каталітична обробка піролізної біонафту з використанням надкритичного етанолу як джерела водню.

Робота [15] присвячена експериментальному дослідженню функціонування середньо-оберткових дизельних двигунів на суміші нафтового дизеля і біодизеля (FAME) обсягом 5-20%. За результатами дослідження розроблено рекомендації для забезпечення безперервної роботи енергетичної установки судна на сумішевому паливі. Аналогічні експериментальні дослідження проведені авторами [16, 17]. Зроблено висновок про поліпшення екологічних показників роботи судових дизелів при застосуванні в них паливних сумішей з біодизелем.

Перспективи використання водневого палива на морському транспорті, включаючи переваги та можливі проблеми цього напрямку, проаналізовано в роботі [18]. За думкою авторів, у перспективі водневе паливо може стати основним рішенням для скорочення викидів парникових газів на судноплавстві.

Поточну і перспективну собівартість виробництва альтернативних морських палив, у тому числі біопалив (біодизель I і II покоління, HVO), розглянуто в дослідженні [19]. Стосовно біопалив зроблено висновок, що поки вони залишаються дорожчими за традиційні палива. Однак, за умов певного підвищення податків/штрафів за використання викопних палив, HVO може стати конкурентоздатним вже в найближчому майбутньому.

Основні бар'єри для ефективного використання морських біопалив визначено в роботі [20]. До них віднесено, зокрема, високу вартість біопалив, обмежений досвід судноплавства з поводження з певними видами біопалив, відсутність результатів довгострокових випробувань та деякі інші.

Згідно висновків дослідження [21], поки що не визначене оптимальне поєднання різних видів альтернативних палив для декарбонізації перевезень водного транспорту. Це пояснюється існуванням ще невирішених проблем, пов'язаних з питаннями сталості, а також з інфраструктурою та розподілом, зокрема, рідких біопалив, біометану, аміаку, водню, метанолу. Подальше дослідження переваг і недоліків різних альтернативних палив для різних видів водного транспорту сприятиме створенню умов для збільшення виробництва і практичного застосування цих палив у двигунах суден.

## 5. Методи досліджень

Авторами було застосовано такі методи теоретичного дослідження як аналіз, синтез, порівняння, абстрагування. Використання порівняльного аналізу дало можливість виявлення і визначення властивостей та характеристик окремих об'єктів дослідження на основі зібраних статистичних даних і емпіричних досліджень. Також застосовано метод вторинного дослідження, який спирається на необхідні дані, що є у вільному доступі. Автори користувалися відкритими даними з вітчизняних та зарубіжних наукових статей, звітів, інтернет-ресурсів.

## 6. Результати досліджень

Основні види біопалива, що можуть використовуватися на морському транспорті, можна умовно розділити на чотири групи. Це розділення ґрунтується на властивостях біопалива і можливостях заміщення певних видів суднових палив [22]:

1. Біодизель (FAME), відновлюваний дизель (HVO), дизель Фішера-Тропша (Ф-Т), диметилловий етер (ДМЕ).
2. Біоетанол, біометанол.
3. Пряма рослинна олія (SVO), біонафта від піролізу біомаси, біонафта від гідротермального зрідження біомаси (HTL).
4. Зріджений біометан.

Біопалива груп 1 і 2 можуть бути альтернативою дистильтовому судовому паливу. Група 3 може заміщувати традиційний мазут (HFO), а також мазут із дуже низьким (VLSFO) та наднизьким (ULSFO) вмістом сірки. Зріджений біометан може замінити скраплений природний газ, який є альтернативою традиційним судовим паливам, але не є відновлюваним енергоносієм. Ключові фактори впровадження альтернативних палив для водного транспорту пов'язані з потенційними перевагами для навколишнього середовища, сумісністю з іншими видами палива, наявністю достатніх обсягів палива для потреб судноплавства, витратами на бункерування та міжнародними правилами.

В таблиці 3 наведено порівняльний аналіз потенційних біопалив для морського транспорту з оцінкою їх рейтингу для умов України. При визначенні рейтингу враховано наступні аспекти, вага кожного з яких оцінювалася від 0 до 1 балів:

1. досягнення комерційного рівня технології виробництва біопалива (1 – комерційно виробляється; 0 – комерційно не виробляється);
2. складність технології з огляду на хімічні перетворення (1 – нескладна; 0 – складна);
3. сумісність з існуючими двигунами і паливною системою суден (1 – сумісна; 0 – не сумісна);
4. сумісність з існуючою інфраструктурою бункерування (1 – сумісна; 0 – не сумісна);
5. наявність потенціалу сировини (1 – наявний значний невикористаний потенціал; 0 – обмежений потенціал);
6. доступність сировини на ринку (1 – сировина доступна на ринку; 0 – сировина має обмежену пропозицію на ринку);
7. високий об'ємний енергетичний вміст біопалива (1 – енергетичний вміст біопалива близький до традиційних суднових палив; 0 – енергетичний вміст біопалива значно менше традиційних суднових палив);
8. стандартизація (1 – наявні стандарти на біопаливо; 0 – відсутні стандарти на біопаливо);
9. доступність ціни (1 – ціна близька до ціни традиційних суднових палив; 0 – ціна у разі перевищує ціни традиційних суднових палив);
10. високі показники скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу палива (1 – скорочення викидів парникових газів понад 70% у порівнянні із традиційними судовими паливами; 0 – скорочення парникових газів незначне).

Оцінювався як поточний рейтинг, так і майбутній з фокусом на середньострокову перспективу (до 10-15 років), що дало можливість сформувати сумарний рейтинг для кожного виду біопалива. У довгостроковій перспективі (більше 20 років) ситуація може суттєво змінитися через розвиток новітніх технологій, зміну економічних умов та інші фактори. Максимальна оцінка рейтингу біопалива складає 10 балів.

За результатами проведених порівняльного аналізу та оцінки, найбільш перспективними для України вбачаються наступні біопалива для водного транспорту:

- Біометан, який може використовуватися у стисненому або скрапленому вигляді.
- Біодизель (FAME) та гідроочищена рослинна олія (HVO).
- Піролізна біонафта за умови проведення додаткових теоретичних та експериментальних досліджень з позитивними результатами.

**Таблиця 3.** Порівняльний аналіз потенційних біопалив для морського транспорту з оцінкою рейтингу перспектив їх використання.

Вид біопалива	Переваги	Недоліки	Рейтинг для запровадження в Україні (по 10-бальній шкалі)
Біометан	<ul style="list-style-type: none"> <li>Відпрацьована технологія виробництва, можливість транспортувати у існуючих газових мережах.</li> <li>Можливість переробки різних видів біомаси в однаковий кінцевий продукт.</li> <li>Для підвищення енергоємності паливних резервуарів можливість зрідження або стиснення.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Обсяги виробництва обмежуються наявними локальними запасами сировини.</li> <li>Значні капітальні витрати у біогазові установки та обладнання для очищення біогазу до біометану.</li> <li>Для використання як палива для транспорту біометан необхідно зріджувати за криогенної температури <math>-162^{\circ}\text{C}</math> або стискати до 200-250 бар.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Високий Сумарний: 9</p>
Біодизель (FAME)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Можливість застосування як «палива для заправки» (“drop-in fuel”) в існуючих паливних системах із використанням наявних резервуарів та інфраструктури бункерування.</li> <li>Чинний міжнародний стандарт ISO 8217 дозволяє додавати до 7% FAME у дистильні палива.</li> <li>Реалізовано багато проєктів у водному транспорті із використанням сумішей FAME до 20%.</li> <li>Комерційний продукт на ринку палива різних країн.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Відносна обмеженість ресурсів сталої сировини.</li> <li>При виробництві з олійних культур скорочення викидів парникових газів може не відповідати вимогам Директиви ЄС RED III.</li> <li>Висока вартість при виробництві з олійних культур.</li> <li>Необхідність використання метанолу при виробництві.</li> <li>При використанні чистого FAME необхідна певна модернізація двигунів, зокрема, заміна шлангів, фільтрів, сальників на пристосовані до біодизелю.</li> <li>У чистому FAME необхідно використовувати різні добавки для пригнічення росту бактерій, зниження температури застигання, покращення стабільності, тощо.</li> </ul>	<p>Поточний: Середній Перспективний: Вище середнього Сумарний: 8</p>

## Продовження таблиці 3

<p>Гідроочищена рослинна олія (HVO)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Якісне паливо з біомаси, хімічний склад якого відповідає традиційному. В ЄС HVO стандартизоване EN 15940.</li> <li>• Енергетичний вміст близький до традиційного суднового палива.</li> <li>• Можливість використовувати у існуючій інфраструктурі та паливних системах у чистому вигляді та як добавка для традиційного палива.</li> <li>• Комерційний продукт.</li> <li>• Значне скорочення викидів ПГ при виробництві з відходів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Відносна обмеженість ресурсів сталої сировини.</li> <li>• При виробництві з олійних культур скорочення викидів ПГ може не відповідати вимогам Директиви ЄС RED III.</li> <li>• Складна технологія обумовлює високу вартість біопалива.</li> </ul>	<p>Поточний: Середній Перспективний: Високий Сумарний: 7</p>
<p>Піролізна біонафта</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Скорочення викидів оксидів сірки і азоту.</li> <li>• Можливість застосування як сировини для виробництва метанолу.</li> <li>• Можливість застосування технологій для значного підвищення якості.</li> <li>• Для суднових дизельних двигунів можна використовувати як компонент емульсійного біопалива для підвищення теплової ефективності та зменшення викидів твердих частинок.</li> <li>• Можливість використовувати значні ресурси сталої сировини, зокрема, лігноцелюлозної біомаси, що забезпечить значне скорочення викидів ПГ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Технологія поки не вийшла на комерційний рівень, хоча є доволі багато прикладів роботи промислових установок.</li> <li>• Порівняно низький енерговміст: 17-20 МДж/кг.</li> <li>• Зависокий рівень кисню, щоб вважатися вуглеводневим паливом.</li> <li>• Висока здатність до окислення.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Середній Сумарний: 6</p>



## Продовження таблиці 3

Дизель Фішера-Тропша	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Придатність використання як «палива для заправки» (“drop-in fuel”) в існуючих паливних системах та наявній інфраструктурі бункерування. У ЄС діє стандарт EN 15940.</li> <li>• Можливість використовувати значні ресурси сталої сировини, зокрема, лігноцелюлозної біомаси, що забезпечить значне скорочення викидів ПГ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Паливо з високою доданою вартістю, технологія виробництва якого орієнтована на дорогий сегмент транспорту, зокрема, авіацію.</li> <li>• Процес Фішера-Тропша відпрацьований і комерційно використовується для переробки вугілля та природного газу. Але для біомаси ця технологія ще розвивається і не досягла комерційних масштабів виробництва.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Середній Сумарний: 5</p>
Пряма рослинна олія (SVO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Проста технологія виробництва.</li> <li>• Можливість використання для заміни мазуту у двигунах з низькою частотою обертання.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Тривале використання призводить до зносу деталей двигуна.</li> <li>• Втрачає стабільність при зберіганні, тому потрібно використовувати антиокислювальні добавки.</li> <li>• Відносна обмеженість ресурсів сталої сировини.</li> <li>• При виробництві з олійних культур скорочення викидів ПГ може не відповідати вимогам Директиви ЄС RED III.</li> <li>• Обмежений досвід використання як комерційного палива.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Ниже середнього Сумарний: 4</p>
Диметиловий етер (ДМЕ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Синтез-газ може бути перероблений у ДМЕ як альтернатива процесу Фішера-Тропша.</li> <li>• Високе цетанове число: 55-60.</li> <li>• ДМЕ зберігається в рідкому стані при відносно низькому тиску 0,5 МПа.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низька щільність енергії зрідженого ДМЕ: 19 МДж/л.</li> <li>• Низька в'язкість та погані змащувальні властивості.</li> <li>• Токсичний у великих концентраціях.</li> <li>• Не отримав розповсюдження як комерційне паливо. Використовувався лише як паливо для малих суднах у демонстраційних проектах.</li> <li>• Застосовують у модернізованих або спеціальних двигунах.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Середній Сумарний: 4</p>

## Продовження таблиці 3

Біоетанол	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Найбільш розповсюджене біопаливо у світі.</li> <li>• Можливість виробництва з лігноцелюлозної сировини, що забезпечує значне скорочення викидів ПГ.</li> <li>• Проста модернізація існуючої інфраструктури бункерування для впровадження біоетанолу.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Розвиток нових технологій багатопаливних дизельних двигунів може потенційно відкрити ринок морського палива для біоетанолу, але цього можна очікувати лише у довгостроковій перспективі.</li> <li>• Висока вартість біоетанолу з лігноцелюлозної сировини (передове біопаливо).</li> <li>• Легкозаймистість.</li> </ul>	<p>Поточний: Середній Перспективний: Середній Сумарний: 5</p>
Біонафта НТЛ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Високий енергетичний вміст: 32-36 МДж/кг.</li> <li>• Може бути використана для суднових двигунів.</li> <li>• Може отримуватися з відходів, що забезпечує значне скорочення викидів ПГ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Технологія ще не вийшла на комерційний рівень.</li> <li>• Хімічно відрізняється від нафтових палив та може не відповідати діючим вимогам стандарту ISO 8217-2017.</li> </ul>	<p>Поточний: Низький Перспективний: Середній Сумарний: 5</p>

У порівнянні з попередніми дослідженнями авторів [12], суттєво піднято рейтинг піролізної біонафти. Після додаткової обробки для підвищення якості біонафти може бути ефективним заміником суднових палив. У середньостроковому майбутньому вбачаються значні перспективи розвитку цього напрямку, у тому числі в Україні.

### 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Подальші дослідження мають включати експерименти по практичному застосуванню біопалив у реальних суднових двигунах. Іншим, теоретичним напрямком є техніко-економічне обґрунтування і аналіз життєвого циклу біопалив, що можуть використовуватися на морському транспорті. Зазначені види досліджень заплановані до виконання у міжнародному проєкті SEAFAIRER програми Horizon Europe, який розпочався у вересні 2024 року. В проєкті буде досліджено виробництво і використання піролізної рідини з різних видів біомаси, у тому числі лігноцелюлозної. Передбачено тестове плавання судна на суміші VLSFO з необробленою піролізною біонафтою (10-30%), а також на суміші MDO з біонафтою підвищеної якості (50-100%). Автори статті є учасниками проєкту SEAFAIRER з боку України.

### 8. Висновки

Біопалива є перспективною альтернативою традиційним судновим паливам з точки зору скорочення викидів парникових газів, зменшення емісії сірки та інших шкідливих речовин, а також як спосіб переходу на відновлювані і низьковуглецеві енергоносії. Для України у середньостроковій перспективі доцільним видається виробництво і використання на водному транспорті біометану, біодизеля і гідроочищеної рослинної олії. Піролізна біонафта також є перспективним біопаливом, яке потребує додаткових досліджень і експериментальних випробувань у суднових двигунах.

**Список літератури:**

- 1) Renewables 2024. Global Status Report [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ren21.net/gsr-2024/> – (Дата звернення: 29.08.2024)
- 2) Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805> – (Дата звернення: 09.09.2024)
- 3) Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and amending Council Directive 96/61/EC [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02003L0087-20240301> – (Дата звернення: 29.08.2024)
- 4) Energy efficiency of ships. Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS (Reporting year: 2023), 2024 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://armatorlerbirligi.org.tr/wp-content/uploads/2024/08/ENERGY-EFFICIENCY-OF-SHIPS.pdf> – (Дата звернення: 05.09.2024)
- 5) Nick Savvides. Greener maritime power will be cheaper than fossil fuel by 2025 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://theloadstar.com/greener-maritime-power-will-be-cheaper-than-fossil-fuel-by-2025/> – (Дата звернення: 09.09.2024)
- 6) International Maritime Organization (IMO) 2020. Strategies in a Non-Compliant World, 2020 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/finance/international-maritime-organization-pov-2020.pdf> – (Дата звернення: 29.08.2024)
- 7) Robert K. Nelson, Alan G. Scarlett, Marthe Monique Gagnon, Alex I. Holman et al. (2022). Characterizations and comparison of low sulfur fuel oils compliant with 2020 global sulfur cap regulation for international shipping. *Marine Pollution Bulletin*, v. 180:113791. doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113791>
- 8) Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2024-07-16> – (Дата звернення: 09.09.2024)
- 9) Tor I. Simonsen, Noah D. Weiss, Susan van Dyk, Elke van Thuijl et al. Progress towards biofuels for marine shipping. IEA Bioenergy: Task 39, 2021 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/Progress-towards-biofuels-for-marine-shippingT39-report\\_June-2021\\_Final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/Progress-towards-biofuels-for-marine-shippingT39-report_June-2021_Final.pdf) – (Дата звернення: 04.09.2024)
- 10) Chia-wen Carmen Hsieh, Claus Felby. Biofuels for the marine shipping sector. IEA Bioenergy: Task 39, 2017 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf> – (Дата звернення: 04.09.2024)
- 11) Драгнєв С.В., Желєзна Т.А., Гайдай О.І. (2023). Перспективи використання альтернативних палив на водному транспорті. *Теплофізика та теплоенергетика*, №1 (45), с. 55-63. doi: <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.7>
- 12) T. Zheliezna, S. Drahniev (2022). Comparative analysis of biofuels and other alternative fuels for introduction in aviation and waterborne transport of Ukraine. *Journal of Science*. Lyon, N 37, p. 37-42. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7409774>
- 13) Luís Cortez, Telma Teixeira Franco, Gustavo Valença and Frank Rosillo-Calle (2021). Perspective Use of Fast Pyrolysis Bio-Oil (FPBO) in Maritime Transport: The Case of Brazil. *Energies*, v. 14: 4779. doi: <https://doi.org/10.3390/en14164779>
- 14) Wajahat Waheed Kazmi, Ghazaleh Amini, Ji-Yeon Parka, and In-Gu Lee (2024). Catalytic upgrading of the heavy fraction of waste coffee grounds pyrolysis bio-oil using supercritical ethanol

as a hydrogen source to produce marine biofuel. *Chemical Engineering Science*, v. 287: 119761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.119761>

15) Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O. et al. (2024). Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*, v. 224: 120221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>

16) Мадей В.В. (2022). Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження. *Суднові енергетичні установки*, № 44, с. 93-110. <http://seu.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD44-93-110.pdf>

17) Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. (2024). Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження. *Водний транспорт*, № 1 (39), с. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20

18) Мельник О.М., Шумило О.М., Онищенко О.А., Михайлова Ю.В. та ін. (2023). Концепція та перспективи використання водневого палива на морському транспорті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, № 203, с. 96-105. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277913>

19) Solakivi T., Paimander A., Ojala L. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 113: 103500. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>

20) Мельник О.М., Бурлаченко Д.А., Пастернак О.Я., Чеча О.П. та ін. (2023). Технології та перспективи альтернативних видів палива для морських суден. *Грааль науки*, № 25, с. 215-220. doi: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.03.2023.034>

21) Grosso M., Marques Dos Santos F., Gkoumas K., Ortega Hortelano A. et al. (2021). *Waterborne transport in Europe – the role of Research and Innovation in decarbonisation. JRS Report*. doi:10.2760/59479

22) Laursen R., Barcarolo D., Patel H., Dowling, M. et al. Update on potential of biofuels in shipping, EMSA, 2023 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html> – (Дата звернення: 12.09.2024)

---

## Analysis of prospects for the use of biofuels in marine transport

### Tetiana Zheliezna

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID 0000-0002-9607-3022

### Semen Drahnev

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID 0000-0003-3754-4186

---

**Abstract:** The prospects of using biofuels as a substitute for traditional marine fuels are analysed. The topicality of the issue is related to the fact that the introduction of alternative fuels, including biofuels, is a possible way for reducing greenhouse gas emissions and fulfilling the requirements of the International Maritime Organization regarding the mandatory use of low-sulphur fuels. Biodiesel, hydrotreated vegetable oil, straight vegetable oil, and liquefied biomethane are usually considered among potential biofuels for the replacement of traditional marine fuels. A promising direction is also the use of fast pyrolysis bio-oil, especially after its additional processing in order to improve the quality and fuel properties. A comprehensive comparative analysis of various types of biofuels that can be used in marine transport has been carried out. Biofuels have been ranked according to prospects, priority and feasibility of their use as a substitute for traditional marine fuels for Ukraine's conditions. Both, the current rating and the future rating have been evaluated with a focus on the

medium-term perspective of 10-15 years. which made it possible to form a total rating for each type of biofuel. It has been concluded that for Ukraine in the medium-term perspective, the production and use of biomethane, biodiesel and hydrotreated vegetable oil in water transport seems expedient. Pyrolysis bio-oil is also a promising biofuel that requires some additional research and experimental testing in marine engines. Such activities are planned to be carried out in the international project SEAFAIRER. It is a project supported by the Horizon Europe program, which began in September 2024. The authors of the article are participants of the SEAFAIRER project from Ukraine.

**Key words:** decarbonisation, renewable energy, biofuel, alternative fuel, marine transport.

---