



Funded by
the European Union



EU4Climate

UABIO



Вебінар «Використання альтернативних видів палива в авіаційному та водному транспорті», 22.11.2022

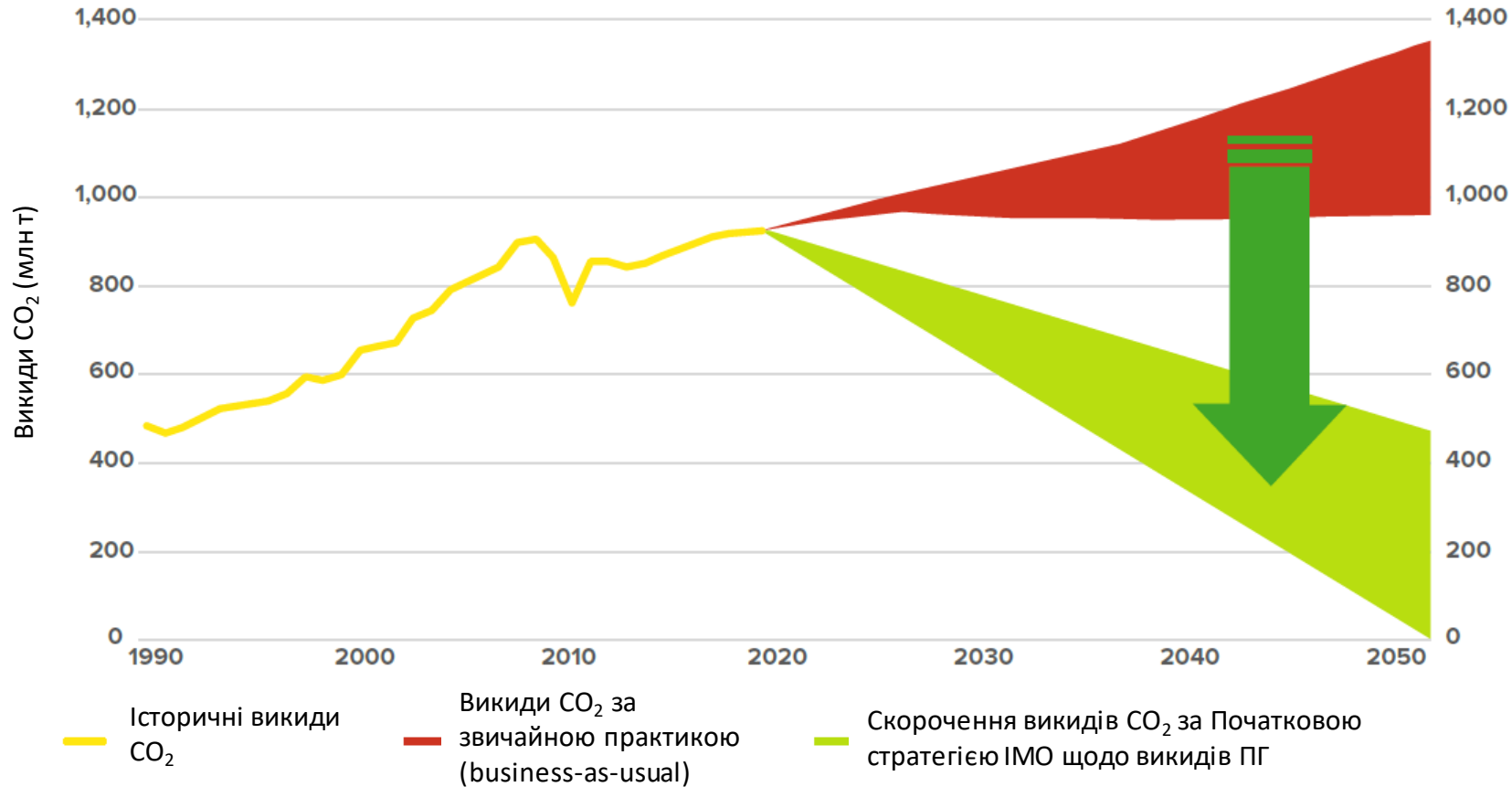
Порівняльний аналіз альтернативних палив для водного транспорту

Семен Драгнєв, к.т.н.

ГО «Агентство з відновлюваної енергетики»



Динаміка викидів CO₂ від міжнародного судноплавства



На судноплавство припадає близько **3% глобальних антропогенних викидів парникових газів (ПГ)** і щорічно цим сектором викидається **15%** глобальної емісії SO_x та **13%** NO_x.

Без рішучих дій прогнозується, що викиди ПГ від судноплавства продовжать зростати і до 2050 р. досягнуть діапазону від **90%** до **130%** викидів 2008 р.

Початкова стратегія Міжнародної морської організації (IMO) передбачає скорочення загальних викидів ПГ на рівні не менше **50%** до 2050 р. у порівнянні з 2008 р.

У 2021 р. викиди CO₂ у світовому судноплавстві зросли на **4,9%** порівняно з 2020 р. та перевищили рівень 2019 р. незважаючи на посилення нормативно-правового регулювання викидів ПГ

<https://www.u-mas.co.uk/wp-content/uploads/2021/04/Summary-for-policy-makers.pdf>

<https://www.ssyonline.com/media/2016/sy-2022-outlook-final.pdf>

Доступні технології для декарбонізації судноплавства та їх потенціал скорочення викидів ПГ



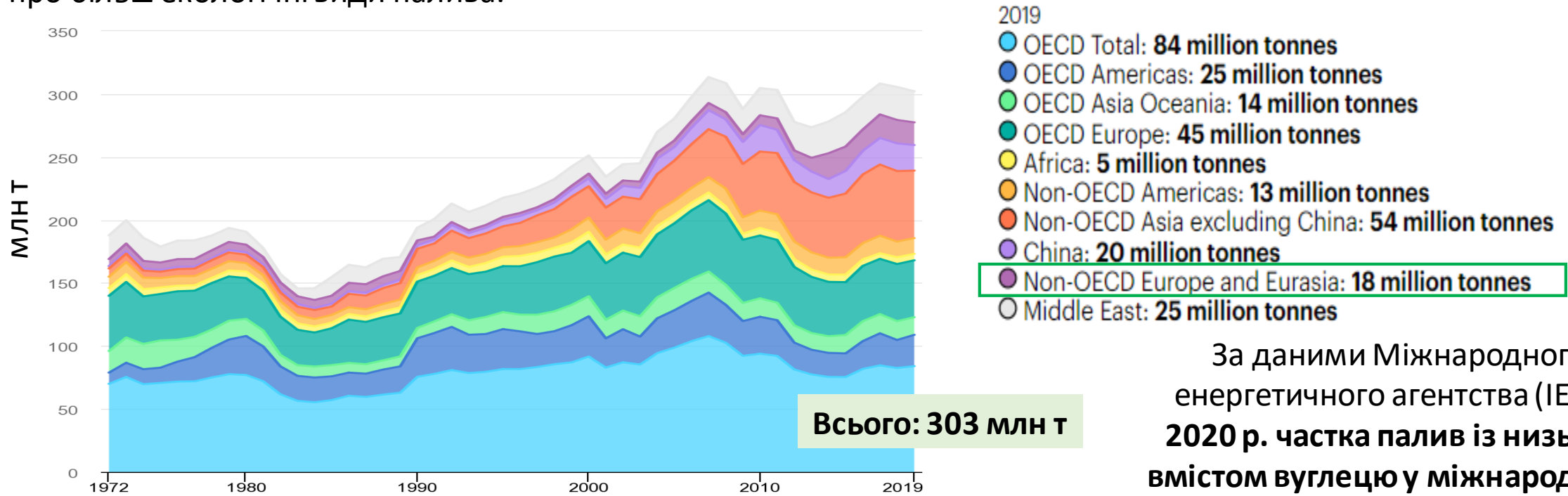
<https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050-download.html>

Міжнародна морська організація (ІМО) розробляє політики щодо скорочення викидів парникових газів для міжнародного судноплавства. З 1 січня 2019 р. запрацювала система збору даних ІМО (DCS) щодо споживання палив для суден валовою місткістю від 5000 т. З 1 січня 2023 р. запроваджуються **індекс енергоефективності існуючого судна (ЕЕХІ)** та **індикатор інтенсивності вуглецю (СІІ)**.

Відповідно до прогнозів Четвертого дослідження ПГ ІМО (Fourth IMO GHG Study) 2020, **близько 64%** загального обсягу скорочення CO₂ від судноплавства в 2050 р. буде досягнуто за рахунок використання **альтернативних палив з низьким/нульовим вмістом вуглецю**.

Світові поставки нафтопродуктів до міжнародних морських бункерів для окремих регіонів з 1972 до 2019 р.

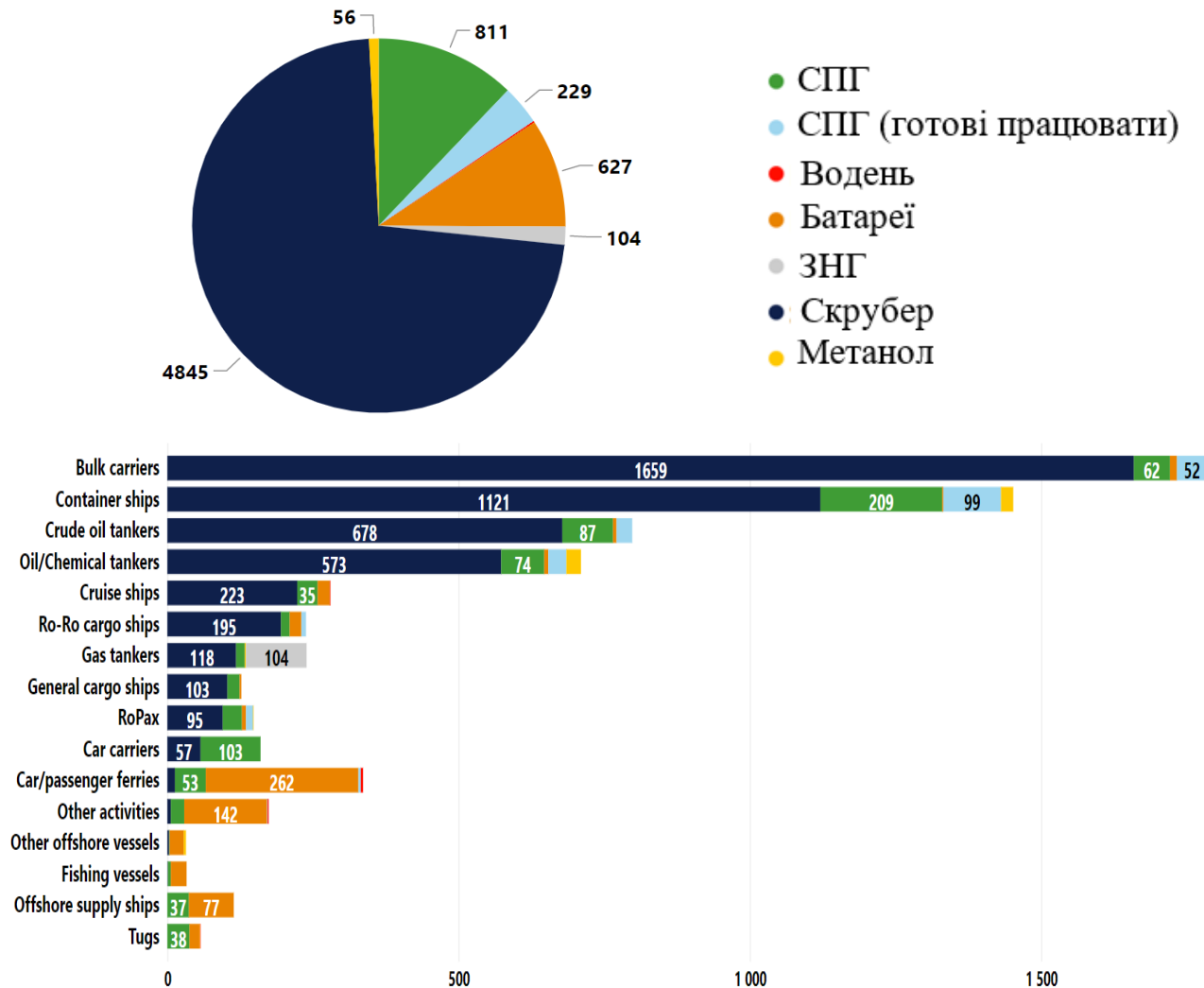
Згідно вимог Міжнародної конвенції із запобігання забрудненню з суден (МАРПОЛ) щодо вмісту сірки у паливі у районах контролю викидів (ECAs – Emission Control Areas) з 1.01.2015 р. граничний вміст сірки в судновому паливі складає 0,1%. З 1.01.2020 р. ІМО посилили екологічні вимоги МАРПОЛ до палива із зниженням максимально допустимої частки сірки з 3,5% до 0,5%. Ці обмеження змушують операторів суден і суднобудівників замислюватися про більш екологічні види палива.



За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) у 2020 р. частка палив із низьким вмістом вуглецю у міжнародному судноплаванні становила 0,1%.

● OECD Total ● OECD Americas ● OECD Asia Oceania ● OECD Europe ● Africa ● Non-OECD Americas ● Non-OECD Asia excluding China ● China ● Non-OECD Europe and Eurasia ● Middle East

Кількість суден у експлуатації та замовленні за видами альтернативних палив і використанням скруберів

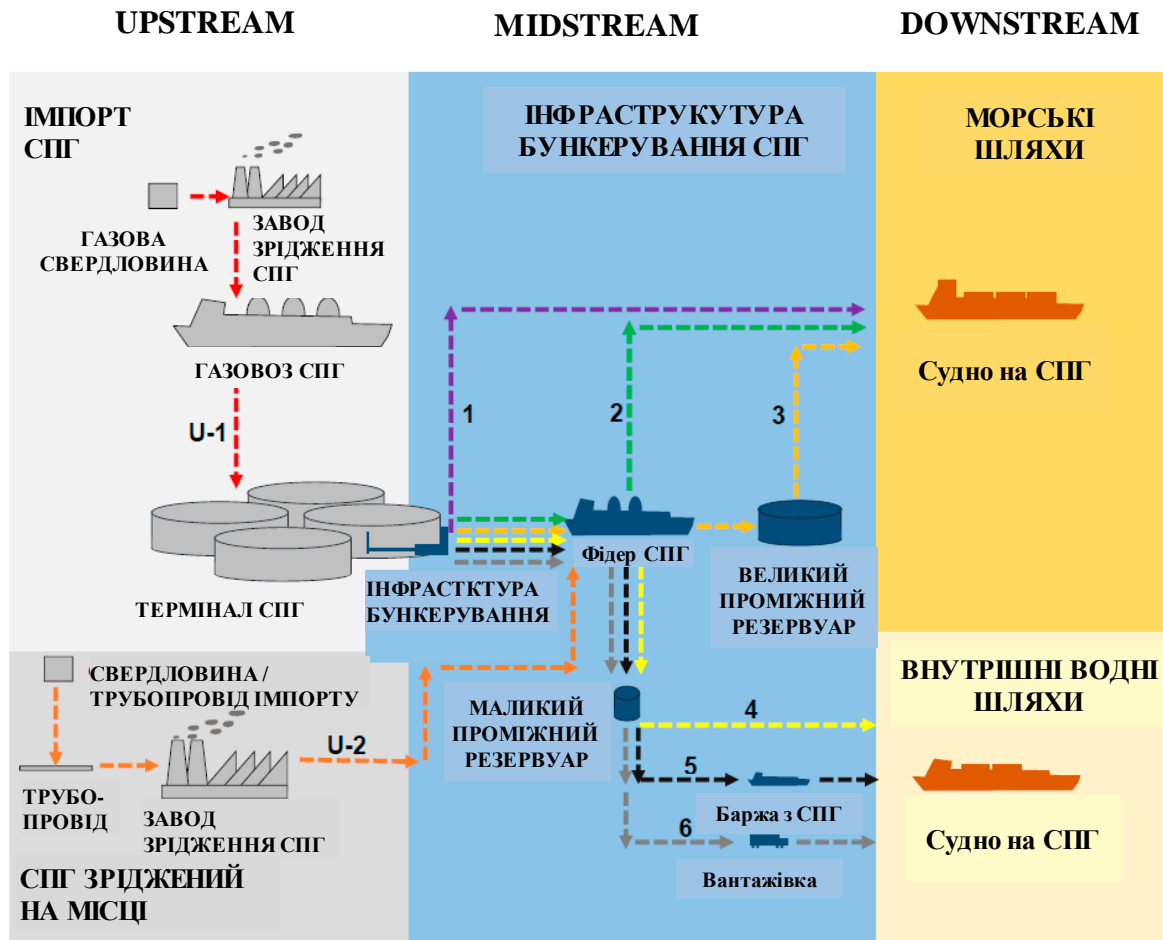


За даними Міжнародного сертифікаційного і класифікаційного товариства DNV у водному транспорті нині найбільш поширеним способом зменшення викидів у атмосферу є застосування скруберів (4845 суден), 1835 суден можуть використовувати альтернативна палива, зокрема, **811 суден на СПГ, 229 готові працювати на СПГ, 627 на електричних батареях, 104 на ЗНГ, 56 на метанолі та 8 на водні.**

Залежно від розміру двигуна, **інвестиційні витрати для скруберів становлять у діапазоні від 650 дол. США/кВт (двигун потужністю 5000 кВт) до 150-100 дол. США за кіловат (двигуни 40 МВт і більше).** Експлуатаційні витрати скруберів складаються з витрат на технічне обслуговування та споживання енергії та становлять приблизно **0,7% загальних витрат на паливо** (судна з потужністю на валу понад 25 МВт)

Скrapлений природний газ (СПГ)

СПГ представляє собою природний газ очищений та переведений у рідкій стан за рахунок охолодження до температури -162°C . СПГ займає близько 1/600 об'єму природного газу в газоподібному стані (за стандартних умов) і складається переважно з метану (CH_4) та з деякою кількістю етану (C_2H_6). Викиди $\text{CO}_{2\text{екв}}$ ланцюга СПГ «від баку до гвинта» на 10-20% нижчі ніж традиційних нафтових палив.



Оцінка вартості компонентів інфраструктури бункерування СПГ

Найменування компоненту	Вартість одиниці, млн. дол. США	Операційні витрати, дол. США/т	Річна потужність, млн. т/рік
Трубопровід (1 км)	0,6	0,1	0,90
Плата за видобуток	–	2,48	–
Резервуар СПГ (50 тис. м ³)	120	18,7	0,91
Резервуар СПГ (700 м ³)	9	0,2	0,01
Судно фідер СПГ (10 тис. м ³)	60,7	2,7	1,84
Судно бункерувальник СПГ	41,9	2,2	0,60
Вантажівка 50 м ³	0,22	0,04	0,04
Інше (причал, шланги, послуги, адміністрація)	40,8	0,4	0,90

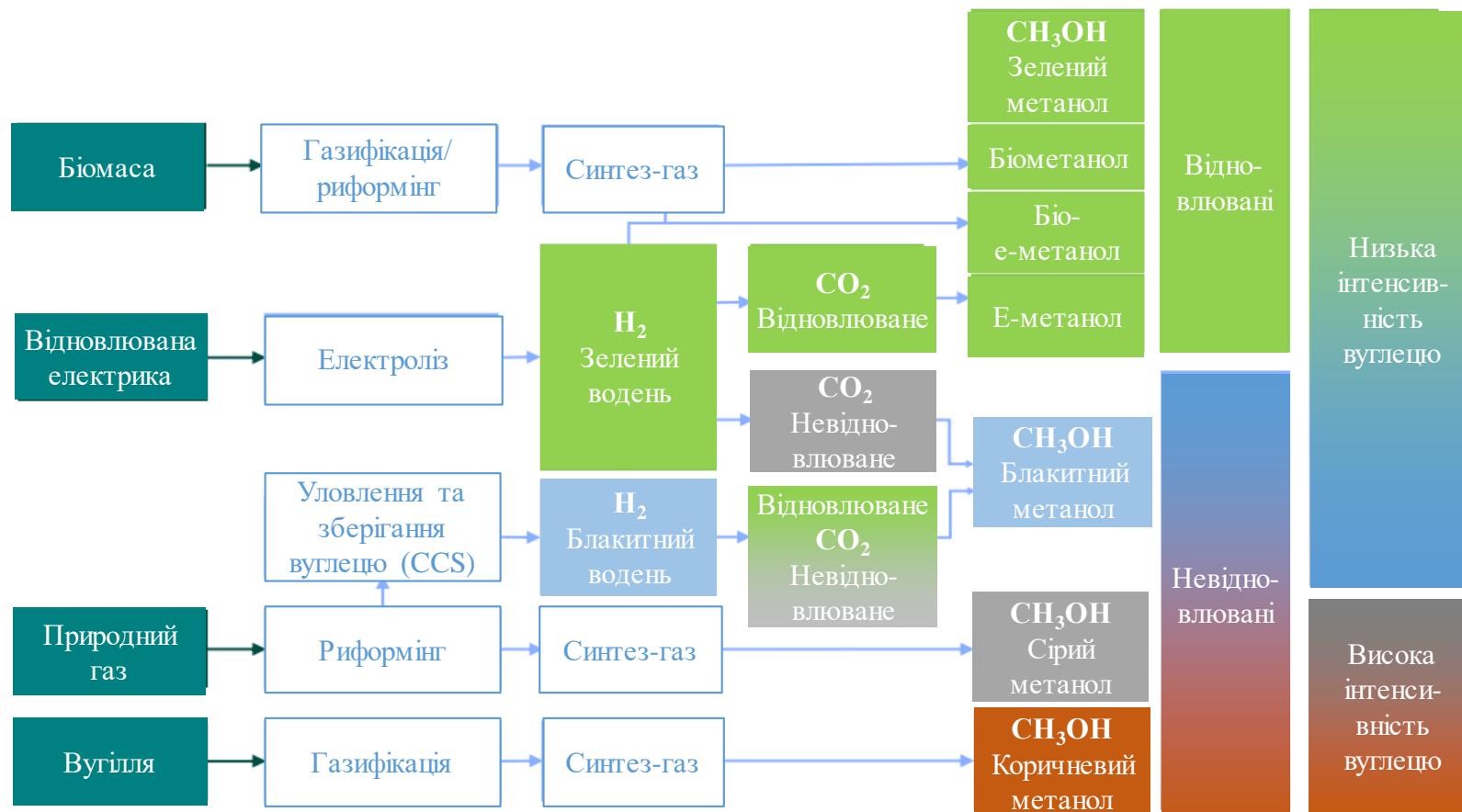
Операційні витрати у інфраструктуру складають 26,82 дол. США/т СПГ.

Модернізація судна з переведенням на використання палива СПГ складає близько 1000 євро/кВт.

Джерело: Baresic, D., Smith T., Raucci, K., Rehmatulla, C., Narula, N. & Rojon, I. 2018, LNG as a marine fuel in the EU: Market, bunkering infrastructure investments and risks in the context of GHG reductions, UMAS, London.

Метанол

Метанол (метилловий спирт) – найпростіший одноатомний спирт CH_3OH . За нормальних умов це прозора, безбарвна, легкозаймиста і летка рідина з характерним спиртовим запахом. Існуюча інфраструктура зберігання палив, їх розподілу та бункерування потребує незначної і відносно недорогої модифікації. Метанол токсичний і проковтування більше 20 мл може бути летальним.



При використанні метанолу порівняно з мазутом викиди SO_x зменшуються більш ніж на 99%, твердих частинок (PM) – 95% і NO_x – 60-80%. Викиди CO_2 WtW залежать від сировини, так для деревних відходів – 5,3-22,6 г $\text{CO}_2\text{-екв}/\text{МДж}$.

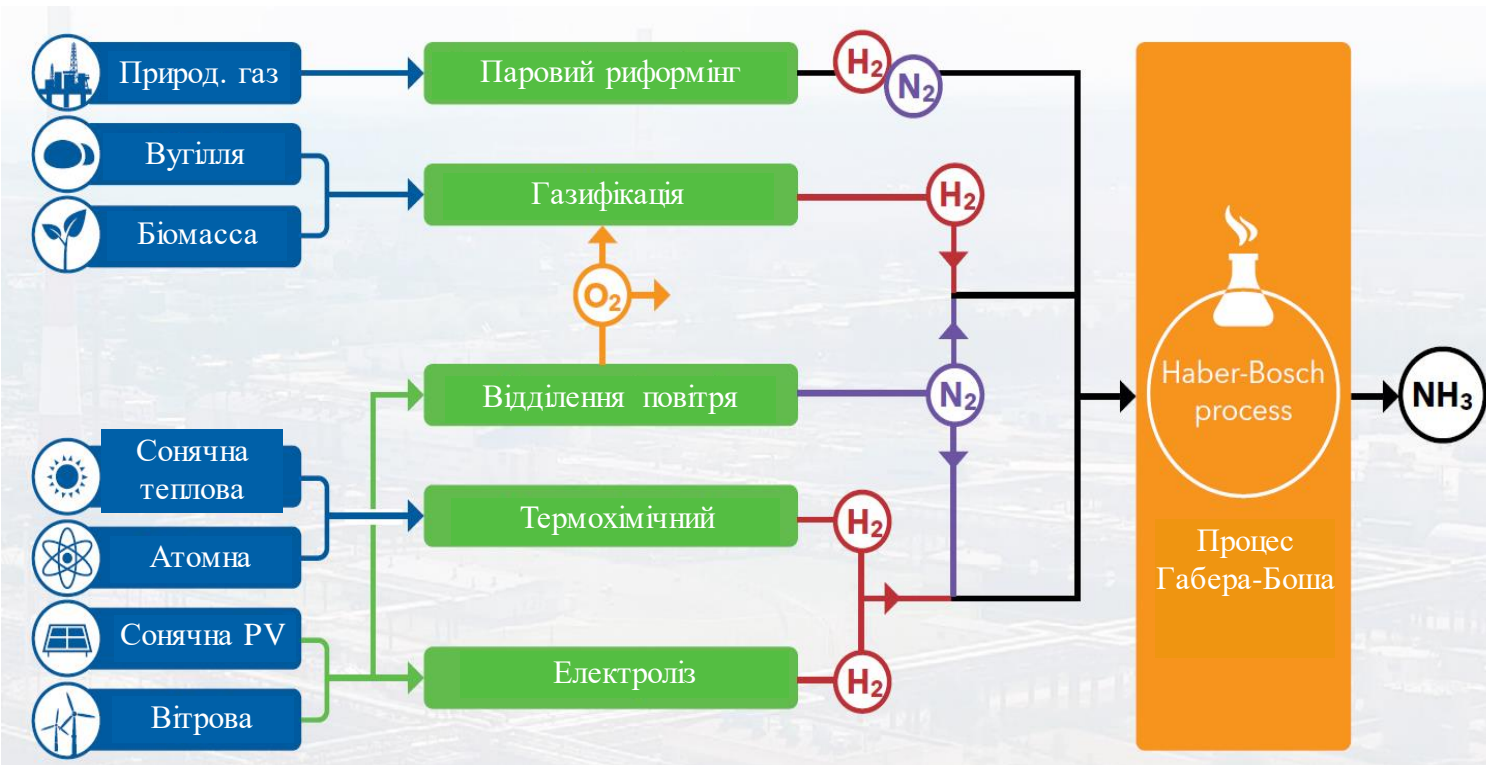
Вартість цистерни для метанолу ємністю 20 тис. м³ з обладнанням для завантаження/вивантаження становить 5 мільйонів євро. Існуюче судно-бункерувальник може бути переобладнано для бункерування метанолом за 1,5 млн євро.

Вартість модернізації судна на двопаливну систему метанол/дизельне паливо 250-350 євро/кВт (двигуни 10-25 МВт).

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf

Аміак

Аміак – неорганічна сполука NH_3 і перспективне паливо з нульовими викидами вуглецю для транспорту. За нормальних умов це безбарвний газ із різким задушливим запахом, легший за повітря і добре розчинний у воді. **Температура кипіння аміаку становить $-33,3^\circ\text{C}$.** При тиску понад 8,6 бар і температурі 20°C аміак є рідиною з густиною $0,61 \text{ т/м}^3$. Нижча теплота згоряння $18,6 \text{ МДж/кг}$. Вплив дуже високих концентрацій газоподібного аміаку у повітрі може призвести до пошкодження легень і навіть смерті. Крім цього аміак є корозійним для деяких матеріалів.



Джерело: Ammonia as a marine fuel. DNV GL – Maritime Assessment of selected alternative fuels and technologies. White paper, 2020. – 28 p.

Навіть у невеликих концентраціях у повітрі аміак може надзвичайно подразнювати очі, горло та дихальні шляхи, тому **потрібно впроваджувати жорсткі інструкції з безпеки.**

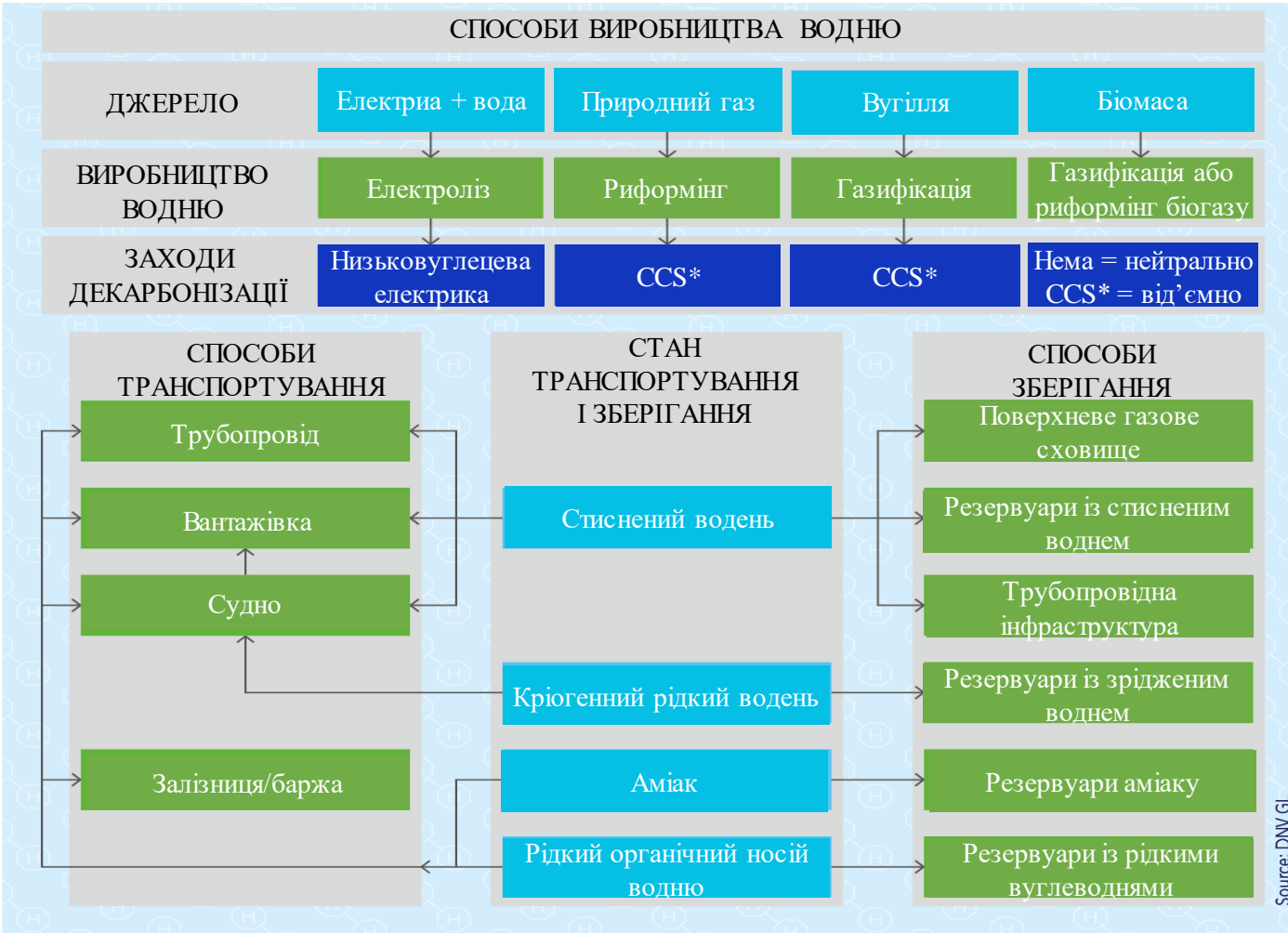
Капітальні витрати на виробництво аміаку з природного газу, нафти та вугілля становлять відповідно 860, 1203 і 2063 дол. США за тону річної виробничої потужності, тоді як річні операційні витрати складають відповідно 2,5%, 2,5% і 5% від капітальних витрат. Інші способи виробництва аміаку у великих масштабах поки що комерційно не доступні.

Очікується що комерційні двигуни на аміаку з'являться у 2024 р.

Аміак, вироблений з природного газу, утворює такі ж викиди як і суднове паливо MGO з низьким вмістом сірки ($88 \text{ кг CO}_2/\text{ГДж}$). Тому **суттєве зменшення викидів парникових газів може бути досягнуто за умови виробництва аміаку із використанням відновлюваних джерел енергії.**

Водень

Водень (H_2) — безбарвний газ без запаху, нетоксичний. Для використання на судах його можна зберігати у вигляді криогенної рідини, стисненого газу або хімічно зв'язаним. Температура кипіння водню $-253^{\circ}C$ при тиску 1 бар. **Зріджувати водень можна при температурах до $-240^{\circ}C$, підвищуючи тиск до «критичного тиску» для водню, що становить 13 бар.** Об'ємна щільність зрідженого H_2 (LH_2) 71 кг/м^3 . Можна зберігати водень й у стисненому стані при тиску 700–300 бар.



Для процесу зрідження необхідно витратити близько 30% енергетичного вмісту газу, а також потрібна енергія для підтримки низької температури у резервуарах.

Водень дуже легкозаймистий, а через дуже малі молекули його складно утримувати у резервуарах, трубопроводах та інших елементах. Тому для широкого впровадження водню як палива для водного транспорту необхідно вирішити ряд проблем, зокрема й з інфраструктурою постачання, зберігання і розподілу, безпекою та нормативною базою.

Паливні елементи вважаються ключовою технологією для використання водню, але поки що їх потужність становить лише кілька сотень кВт. Очікується, що додаткові капітальні витрати звичайних перетворювачів енергії, таких як поршневі двигуни, будуть подібними до двигунів, що працюють на СПГ.

Позначення:

* CCS – Уловлювання та зберігання вуглецю (Carbon capture and storage)

<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Building-a-marine-supply-infrastructure-as-part-of-a-future-hydrogen-society.html>

Біопалива

Біопаливо отримують з первинної біомаси або залишків біомаси, які перетворюються на рідке або газоподібне паливо. Існує велика різноманітність процесів для виробництва традиційного (першого покоління) і вдосконаленого (другого і третього покоління) біопалива, що включає різні види сировини (олії, цукро/крохмалевмісна біомаса, лігноцелюлозна біомаса, деревна маса та водорості) та різні технології конверсії (етерифікація, гідрообробка, ферментація, сольволиз, термохімічні і каталітичні перетворення). Біопалива можна змішувати у великих співвідношеннях із традиційними паливами як «паливо для заправки» (“drop-in fuels”), що дозволяє уникнути потреби в нових паливних резервуарах і паливних системах. Двигуни не потребують змін.

Показник	Біодизель (FAME)	Відновлюване ДП (HVO)	Дизель Ф-Т	Біонафта швидкого піролізу з деревини	Збагачена біонафта	Біонафта гідротермального зрідження з деревини
Питома вага	0,88	0,78	0,765	1,1–1,3	0,84	1,1
Кінематична в'язкість при 40°C, сСт	4–6	2–4	2	40–100		
Цетанове число	47–65	>70	>70			
Змащувальні властивості, мкм		650	371			
Нижча теплотворна здатність, МДж/кг	37,2	44,1	43	16		≈32
Температура помутніння, °C	-3–15	-5 до -34	-18			
Температура застигання, °C	-5–10			-9 до -36		
Вміст води, мас. %	0	0	0	20–35	0,1	8
Вміст кисню, мас. %	11	0	0	34-45	0,5	10–13
Вміст сірки, мас.	<0,0015	<0,0005	<0,1	0–0,05	<0,005	0

У ЄС діють стандарти на метилові етери жирних кислот (FAME) EN 14214 та парафінові дизельні палива синтезу або гідроочищення EN 15940, що включає гідроочищену рослинну олія (HVO) і біомасу в рідину (BtL).

Біогаз, отриманий шляхом анаеробного бродіння, потенційно є сировиною для виробництва зрідженого біометану (БіоСПГ).

Біопалива 2-го покоління забезпечують від 70% скорочення викидів ПГ у порівнянні з MGO.

Електрична енергія

Використання акумуляторних технологій для водного транспорту вважається перспективним **для застосування на коротких відстанях** перевезень. Значна кількість суден, переважно гібридних, вже експлуатуються; більше суден замовлено, спостерігається зростання повністю електричних. Переважно це пороми та інші типи середніх і малих суден. **У майбутньому із розвитком цієї технології, зокрема, збільшення швидкості зарядки, щільності енергії та зменшення вартості, дозволить використовувати акумуляторні системи і для інших напрямків судноплавства.**

Батареї не можуть зберігати величезну кількість енергії, необхідної для живлення великого корабля. Для використання електричних суден з акумуляторними батареями у портах потрібна спеціальна потужна зарядна інфраструктура. Наприклад, щоб зарядити 1000 кВт*год (приблизно еквівалентно 100 літрам нафтового палива) за 30 хвилин, потрібно 2000 кВт електричної потужності, а для зарядки такої ж кількості енергії за 10 хвилин потрібно вже 6000 кВт електричної потужності. Це часто створює значне навантаження на місцеву електричну мережу та може потребувати додаткових ресурсів.

Переваги:

- Гнучкість та зручність використання електричної енергії. Високий ККД електроприводів.
- Якщо електроенергія надходить з ВДЕ, можна вважати, що повністю електричне судно не викидає CO₂, NO_x, PM і SO_x.
- Залежно від силової установки також можна суттєво зменшити шум від роботи двигунів.

Недоліки:

- Через значний розмір і вартість акумуляторів, недоцільно переводити на електроенергію великі судна та судна дальнього плавання.
- Втрата вантажного простору через відносно невеликий енерговміст акумуляторів.
- Збільшення частоти бункерування.

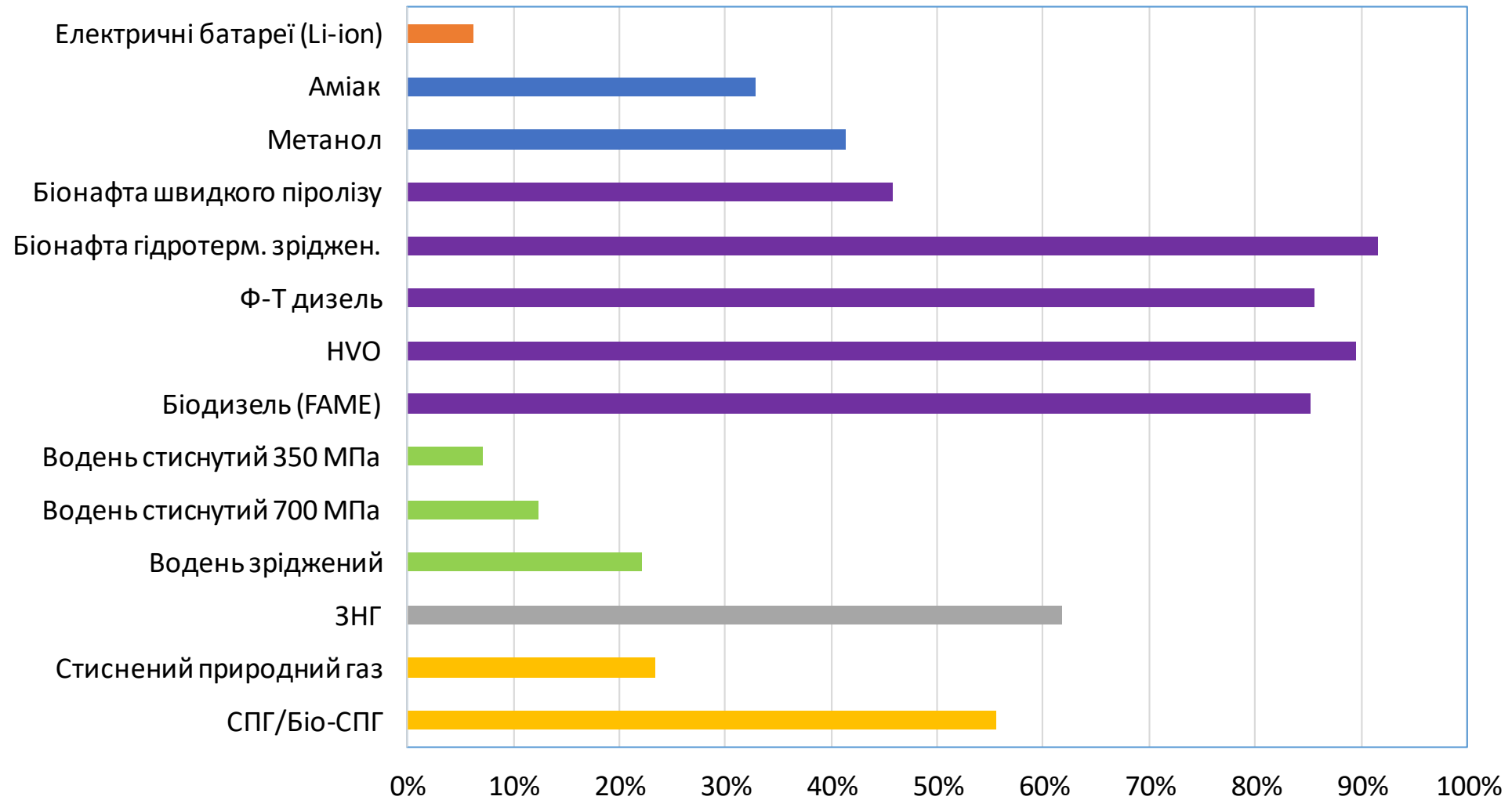


MF AMPERE (Норвегія, 2014 р.)

Перший повністю електричний паром для автомобілів валовим тоннажем 1598 т, потужністю 1090 кВт

<https://corvusenergy.com/projects/mf-ampere/>

Порівняння енерговмісту палив для водного транспорту





Порівняння енергетичного вмісту одиниці об'єму різних видів палива (енергоносіїв) для водного транспорту з енергетичним вмістом суднового палива MDO (100%)

Інфраструктура бункерування альтернативними паливами у Чорному морі



Позначення

-  – об'єкти в експлуатації
-  – об'єкти, про будівництво яких прийнято рішення.

LNG – скраплений природний газ (СПГ);

Am – аміак;

Me – метанол.

<https://afi.dnv.com/Map>

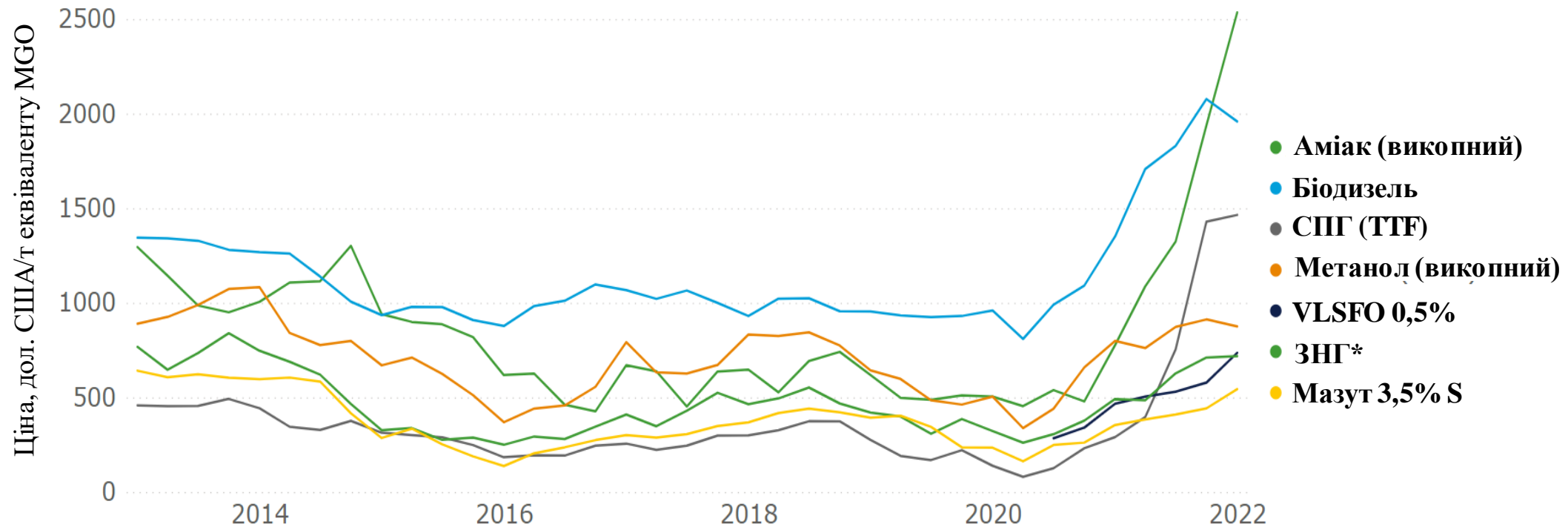
Найбільший в Україні порт «Південний» може приймати судна навіть класу Кейпсайз повною осадкою 18,5 м та дедвейтом 180 тис. т і має можливість для створення вітчизняного хабу бункерування суден альтернативними паливами. В Одеському припортовому заводі поблизу цього порту розташовані потужності з виробництва аміаку й іншої хімічної продукції, а також комплекси для перевантаження аміаку і метанолу у морські судна на експорт. Зокрема, до складу заводу входять два агрегати з виробництва аміаку кожен потужністю 450 тис. т/рік; **комплекс з перевантаження аміаку потужністю 4,3 млн т/рік, зі складом на 120 тис. т; комплекс з перевантаження метанолу потужністю 1 млн т/рік, зі складом на 48 тис. т.**

Проект LNG TERMINAL SOUTH FCZO по будівництву терміналу з перевалки **скрапленого природного газу з річною пропускною спроможністю 200 млн м³ природного газу.**

Вартість палив для водного транспорту

Частка витрат на паливо в експлуатаційних витратах суден може коливатися від близько 35% фрахтової ставки невеликого танкера до близько 53% для контейнеровозів/наливних суден.

https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf



<https://afi.dnv.com/Statistics?repId=4>

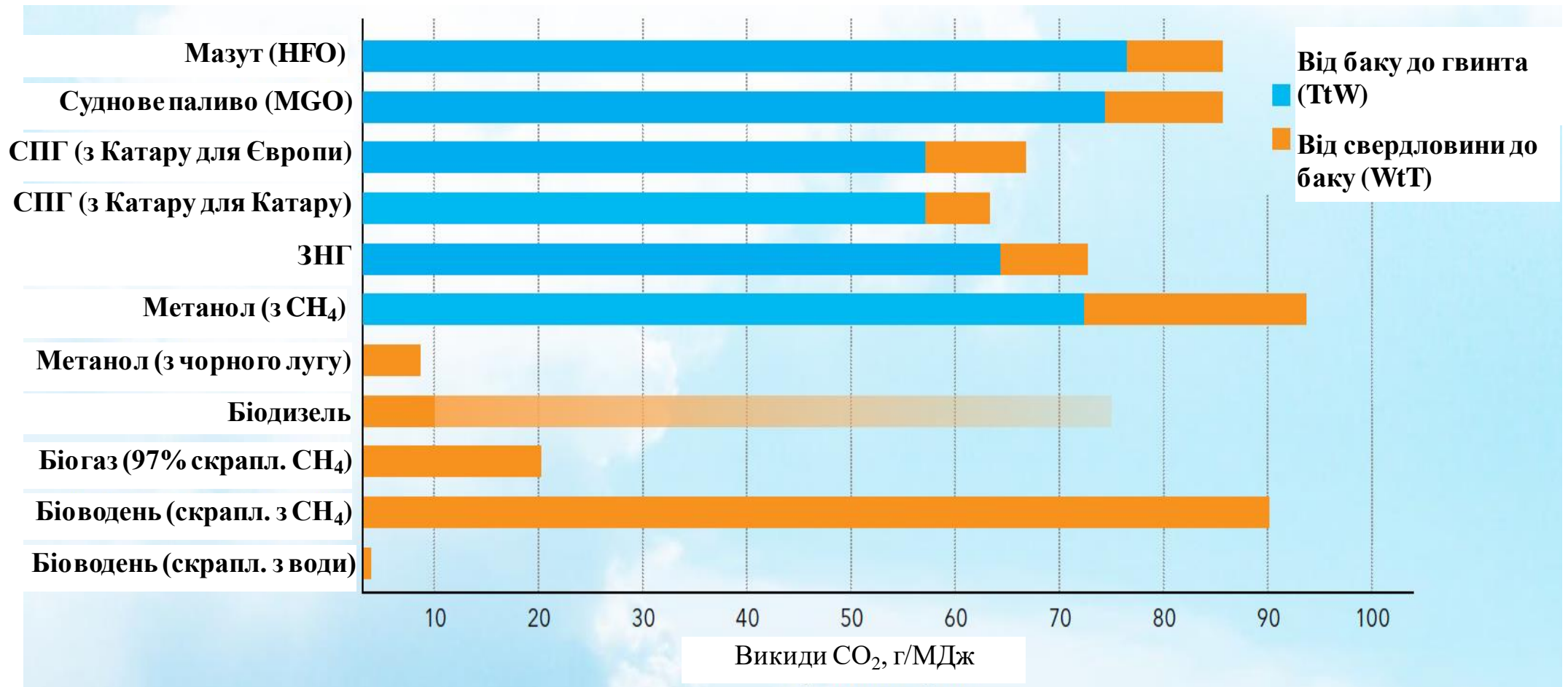
Ціна MGO у Роттердамі на 18.11.2022 р. 932 дол. США/т

Примітка:

* ЗНГ – зріджений нафтовий газ

<https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO>

Викиди ПГ від використання палив для водного транспорту



Джерело: DNV GL – Maritime. Assessment of selected alternative fuels and technologies. 2019. – 56 p.

Порівняний аналіз та рейтинг палив для водного транспорту

Паливо	Технологія	Сировина	Досягнення комерційного рівня / досвід в Україні	Сумісність з існуючими двигунами/ інфраструктурою	Наявність і доступність сировини	Об'ємний енерговміст палива і енергоносія	Стандартизація	Ціна	Скорочення викидів ПГ	Рейтинг (максимум 10)
БіоСПГ	Ферментація/ зрідження	Біомаса	+ / ±	-	+	+	+	+	+	<u>9</u>
FAME	Етерифікація	Рослинні олії/ВХО	+ / +	± / +	+ / ±	+	+	±	± / +	<u>8</u>
HVO	Гідрообробка	Рослинні олії	+ / -	+ / +	+	+	+	±	±	<u>8</u>
		ВХО та жири	+ / -	+ / +	±	+	+	+	+	<u>8</u>
Електроенергія	ВДЕ		+ / -	- / ±	±	-	+	±	+	<u>8</u>
СПГ	Зрідження	Природний газ	+ / -	-	+	+	+	±	-	<u>7</u>
Ф-Т дизель	Газифікація та синтез Ф-Т	Біомаса	- / -	+ / +	+	+	+	±	+	<u>6</u>
Зелений метанол	Газифікація/ риформінг	Біомаса	+ / -	- / -	+	±	+	+	+	<u>6</u>
Зелений аміак	Газифікація	Біомаса	+ / -	-	+	±	-	-	+	<u>6</u>
	Електроліз	Вода	+ / -	-	+	±	-	-	+	<u>6</u>
Зелений водень	Газифікація	Біомаса	+ / -	-	+	-	-	-	+	<u>6</u>
	Електроліз	Вода	+ / -	-	+	-	-	-	+	<u>6</u>
Біоетанол	Ферментація	Цукро-/ крохмалевмісна	+ / +	- / +	+	±	+	+	±	<u>5</u>
	Гідроліз/ ферментація	Лігноцелюлозна	+ / -	- / +	+	±	+	±	+	<u>5</u>
ДМЕ	Газифікація	Біомаса	- / -	- / -	+	±	-	±	+	<u>5</u>
HTL біонафта	Гідротермічне зрідження	Біомаса	- / -	+ / +	+	+	-	±	+	<u>5</u>
ЗНГ	Зрідження	Пропан/бутан	+ / +	± / -	±	±	±	+	-	<u>5</u>
SVO	Екстракція	Рослинні олії	+ / ±	± / ±	+	+	-	±	±	<u>4</u>
Піролізна біонафта	Піроліз	Біомаса	- / -	± / ±	+	±	-	±	+	<u>3</u>
Водень	Риформінг	Природний газ	+ / -	-	+	-	-	-	-	<u>3</u>
Метанол	Риформінг	Природний газ	+ / -	- / -	+	±	+	+	-	<u>3</u>
Аміак	Риформінг	Природний газ	+ / ±	-	+	±	-	-	-	<u>3</u>

Висновки

З точки зору застосування різних видів палива можна виділити **перевезення водним транспортом на короткі відстані та глибоководні**. При перевезеннях на короткі відстані судна зазвичай працюють в обмежених географічних зонах на відносно коротких маршрутах із частими заходами в порти. Через відносно низьку потребу в енергії ці судна часто є ідеальними кандидатами для випробування нових видів палива, що характеризується високими витратами на енергоконверсію або зберігання. Також для скорочення викидів ПГ у існуючих суднах доцільно впроваджувати біопалива FAME та HVO сумісні з наявною інфраструктурою бункерування та двигунами.

Глибоководне судноплавство включає великі океанські судна, які здійснюють довгі маршрути, часто без регулярного розкладу. Ці судна потребують використання палива, яке доступне у всьому світі. Енергоносій, що приводить у рух судно, повинен мати достатньо високу щільність енергії, щоб максимізувати доступний вантажний простір. Для цих суден СПГ може бути життєздатним варіантом, коли відповідна інфраструктура бункерування стане доступною в усьому світі. Біопалива, метанол і зріджений нафтовий газ також можуть бути вибором за умови, що вони можуть бути доступні в необхідних кількостях і відповідного рівня якості. Аміак і водень ще не досягли комерційної зрілості.

За результатами порівняльного аналізу та оцінки **найбільш перспективними для України вбачаються наступні палива для водного транспорту:**

- Біометан, який може використовуватися у стисненому або скрапленому вигляді;
- Біодизель (**FAME**) та гідроочищена рослинна олія (**HVO**);
- Електричні силові установки з акумуляторними батареями;
- Скраплений природний газ (**СПГ**).

Дякую за увагу!

Семен Драгнєв

dragnev@secbiomass.com

<https://rea.org.ua/>

