

ВОДОРОДЪТ КАТО ГОРИВО ЗА МОРСКИ ТРАНСПОРТ НА КЪСИ РАЗСТОЯНИЯ.

ЧАСТ 1: ПРОИЗВОДСТВО, СЪХРАНЕНИЕ, КОРАБНИ ЕНЕРГИЙНИ СИСТЕМИ И ДЕМОНСТРАЦИОНЕН ОПИТ

Инж. Калоян Вангелов
Технически университет - Варна

Резюме: Статията систематизира съвременното състояние на водородните технологии за морски транспорт на къси разстояния – сегмента с най-благоприятни предпоставки за ранно внедряване на водорода като корабно гориво. Извършен е сравнителен анализ на типовете горивни клетки (PEMFC, SOFC, MCFC) и на водородните двигатели с вътрешно горене, съпоставени по ефективност, динамика и приложимост. Анализирани са реално експлоатирани съдове – MV Sea Change, MF Hydra, 500-киловатовият демонстрационен съд – и е изведен фактическият индустриален стандарт на сегмента: хибридна конфигурация горивна клетка–батерия с компресирано съхранение. Систематизирани са производствените пътища на водорода според въглеродния им интензитет и формите за съхранение на борда по обемни и масови показатели. Изведени са аналитични зависимости за предварително оразмеряване на корабна водородна енергийна система – енергиен баланс на маршрута, необходима маса и обем на горивото, хибридно разпределение на мощността. Формулирани са изводи за приложимостта на технологичните конфигурации при фериботни, пътнически и пристанищни плавателни съдове.

Ключови думи: водород, морски транспорт на къси разстояния, горивни клетки, PEMFC, съхранение на водород, хибридни системи, демонстрационни съдове, декарбонизация

HYDROGEN AS A FUEL FOR SHORT-SEA SHIPPING.

PART 1: PRODUCTION, STORAGE, SHIPBOARD ENERGY SYSTEMS AND DEMONSTRATION EXPERIENCE

Eng. Kaloyan Vangelov
Technical University - Varna

Abstract: The paper provides a systematic overview of the current state of hydrogen technologies for short-sea shipping, a segment well-suited for the early adoption of hydrogen as a marine fuel. It includes a comparative analysis of different types of fuel cells (PEMFC, SOFC, MCFC) as well as hydrogen internal combustion engines, focusing on their efficiency, dynamics, and applicable use cases. The analysis examines operational vessels such as the MV Sea Change, the MF Hydra, and a 500 kW demonstration vessel, leading to the identification

of the industry standard for this segment: a hybrid configuration combining fuel cells and batteries with compressed hydrogen storage.

Additionally, the paper categorizes hydrogen production pathways based on carbon intensity and evaluates onboard storage options using both volumetric and gravimetric metrics. It derives analytical relations for the preliminary sizing of a shipboard hydrogen energy system, including route energy balance, required fuel mass and volume, and hybrid power distribution. Finally, the paper concludes regarding the applicability of these technological configurations for ferry, passenger, and harbor vessels.

Keywords: hydrogen, short-sea shipping, fuel cells, PEMFC, hydrogen storage, hybrid systems, demonstration vessels, decarbonisation

1 Въведение

1.1 Емисионен профил на морския транспорт и необходимостта от декарбонизация

Морският транспорт осигурява около 85% от обема на световната търговия и в този смисъл представлява гръбнака на глобалните логистични вериги, но същевременно генерира близо 3% от антропогенните емисии на парникови газове в световен мащаб [58]. По данни, обобщени в съвременната литература, корабоплаването изразходва годишно порядъка на 300 млн. тона гориво, преобладаващо тежко корабно гориво (HFO) и корабно дизелово гориво (MDO/MGO), чието изгаряне освобождава не само въглероден диоксид (CO_2), но и значителни количества серни оксиди (SO_x), азотни оксиди (NO_x) и фини прахови частици (PM) [57],[58], [[18]. Тези замърсители имат двойствен ефект: от една страна, те допринасят за глобалното затопляне, а от друга – влошават качеството на въздуха в крайбрежните и пристанищните райони, където е концентрирана значителна част от населението, като предизвикват респираторни и сърдечносъдови заболявания, киселинни валежи и деградация на морските екосистеми [57], [7].

Прогнозите на Международната Морска Организация (ИМО) показват, че при отсъствие на решителна намеса емисиите от морския транспорт биха могли да нараснат съществено до средата на века вследствие на разширяването на международните търговски маршрути и увеличаването на световния флот [18]. Този сценарий е несъвместим с целите на Парижкото споразумение и предопределя безалтернативността на енергийния преход в сектора. Особеност на морския транспорт, от друга страна, е неговата капиталова инерционност: експлоатационният живот на един кораб обичайно надхвърля 25–30 години, което означава, че инвестиционните решения, вземани днес, ще определят емисионния профил на флота до средата на века и след нея [13, 24]. Затова изборът на гориво и енергийна конверсионна технология се превръща в стратегически въпрос от първостепенно значение, както за корабособствениците и операторите, така и за корабостроителната индустрия и пристанищата.

В структурата на световния флот и на превозната работа, морският транспорт на къси разстояния (short sea shipping) заема особено място. Към него се отнасят фериботните и пътническите линии, Ro-Ro и Ro-Pax превозите, крайбрежните товарни превози, пристанищните и обслужващите кораби, както и превозите по вътрешни водни

пътища, функционално свързани с морските пристанища. Характерните за този сегмент регулярни маршрути с фиксирани разписания, относително кратки преходи, чести престои в ограничен брой пристанища и умерени изисквания за автономност създават качествено различни предпоставки за внедряване на алтернативни горива в сравнение с океанското корабоплаване [13, 34, 45]. Настоящото изследване е посветено на този сегмент, като застъпваната теза е, че морският транспорт на къси разстояния представлява естественият полигон за ранно, технически обосновано и икономически защитимо внедряване на водорода като корабно гориво.

1.2 Регулаторната рамка на ИМО и на Европейския съюз

За да противодейства на нарастващите екологични предизвикателства в корабоплаването, ИМО последователно изгражда все по-строга регулаторна рамка. Първоначалната стратегия за парниковите газове, от 2018 г., постави за цел намаляване на емисиите с най-малко 50% до 2050 г. спрямо равнището от 2008 г., а ревизираната стратегия от 2023 г. издигна амбицията до достигане на нетни нулеви емисии „около 2050 г.“, с индикативни контролни точки за намаление от поне 20% (при стремеж към 30%) до 2030 г. и поне 70% (при стремеж към 80%) до 2040 г. [15, 18]. Инструментариумът включва, както технически мерки - конструктивният индекс за енергийна ефективност на новостроящи се кораби (EEDI) и индексът на съществуващите кораби (EEXI), така и оперативни механизми като индикатора за въглероден интензитет (СИ), а от 2027 г. се предвижда въвеждането на глобален стандарт за горивата и механизъм за ценообразуване на емисиите в рамките на т.нар. Net-Zero Framework [15, 18].

Паралелно с това, Европейският съюз разгръна собствен, още по-настъпателен законодателен пакет. От 2024 г. морският транспорт е включен в Европейската схема за търговия с емисии (EU ETS), която задължава корабните оператори да купуват квоти за емисиите, генерирани по маршрути от, до и между европейски пристанища. Регламентът FuelEU Maritime [11] влязъл в сила от 2025 г., въвежда прогресивно затягащи се изисквания за намаляване на въглеродния интензитет на използваната на борда енергия – от 2% през 2025 г. до 80% през 2050 г. спрямо референтната 2020 г., – като изрично стимулира горивата от възобновяем и невъглероден произход (RFNBO), към които спада зеленият водород [15, 18, 28]. Регламентът за инфраструктурата за алтернативни горива (AFIR) [10] и преработената Директива за възобновяемата енергия (RED III) [9] – допълват рамката откъм страната на брега, като задължават държавите членки да изграждат зарядна и бункеровъчна инфраструктура и определят цели за дела на RFNBO в транспорта. Комбинираният ефект на тези инструменти е, че икономическата тежест на конвенционалните горива нараства предвидимо и кумулативно, с което ценовата разлика между дизеловото гориво и нисковъглеродните алтернативи прогресивно се стеснява [1, 25].

Съществено е да се подчертае, че за морския транспорт на къси разстояния в европейски води регулаторният натиск е най-осезаем: вътрешноевропейските рейсове попадат изцяло (100%) в обхвата на EU ETS и FuelEU Maritime, докато за далечните океански рейсове се отчита само половината от емисиите. Това обстоятелство превръща

фериботните, Ro-Pax и крайбрежните оператори в първите, за които преходът към алтернативни горива придобива непосредствена икономическа логика [1, 34].

1.3 Водородът като чиста енергийна алтернатива

Водородът се откроява като универсален и чист енергиен носител със значителен потенциал за намаляване на корабните емисии. При използване в горивни клетки водородът генерира електроенергия чрез електрохимичен процес, чийто единствен страничен продукт е водна пара, без емисии на CO₂, NO_x, SO_x или прахови частици на борда [7, 20, 57]. Дори при изгаряне в двигател с вътрешно горене водородът не отделя въглероден диоксид, серни съединения и сажиди, макар че високотемпературното горене поражда азотни оксиди, чието ограничаване изисква допълнителни мерки [4, 23]. По масово енергийно съдържание водородът превъзхожда всички конвенционални горива – долната му топлина на изгаряне от около 120 MJ/kg е близо три пъти по-висока от тази на дизеловото гориво, но изключително ниската му обемна плътност поставя предизвикателства пред съхранението, които стоят в центъра на инженерния дебат за морското му приложение [33, 50, 57].

Ключово предимство на водорода е възможността той да бъде произвеждан от възобновяеми енергийни източници чрез електролиза на вода – т.нар. “зелен водород”, при което целият жизнен цикъл на горивото от производството до потреблението може да остане практически без въглерод [28, 46]. Същевременно водородът е и суровинна основа за синтеза на производни горива – амоняк, метанол, синтетичен метан, – поради което изграждането на водородни производствени и логистични вериги има системен ефект върху цялата гама от алтернативни морски горива [48, 50]. В този смисъл водородната икономика и декарбонизацията на корабоплаването са взаимно обуславящи се процеси: пристанищата се очертават като естествени водородни хъбове, обслужващи едновременно корабите, пристанищната техника, наземния транспорт и прилежащите индустриални зони [17, 40, 41].

1.4 Морският транспорт на къси разстояния като приоритетно поле за внедряване

Анализираната литература убедително показва, че физическите ограничения на водорода – ниска обемна енергийна плътност и сложност на съхранението – се преодоляват най-лесно именно при корабите, опериращи на къси разстояния [13, 33, 34, 45]. При океанското корабоплаване необходимият обем на водородните резервоари би погълнал неприемлив дял от товарния капацитет на кораба: моделни изчисления за дълбоководни превози показват, че при течен водород обемът на горивната система може да надхвърли няколкократно този на еквивалентна дизелова инсталация [33]. При фериботите, пътническите корабчета, пристанищните влекачи и крайбрежните съдове, напротив, дневната енергийна потребност е ограничена и предвидима, зареждането може да се извършва ежедневно в едно и също пристанище, а загубата на полезен обем остава в приемливи граници [5, 44, 45].

Към това се прибавят и допълнителни съображения. Първо, корабите на къси разстояния оперират предимно в крайбрежни зони и акватории с висока гъстота на

населението, където елиминирането на локалните замърсители има непосредствен здравен и обществен ефект [7, 57]. Второ, регулярността на маршрутите позволява инфраструктурната инвестиция да се концентрира в едно или две пристанища, вместо да се изгражда глобална бункеровъчна мрежа [17, 39]. Трето, публичният характер на голяма част от фериботните услуги (обществени поръчки, концесии, субсидирани линии) дава на държавите и регионите пряк лост за стимулиране на решения с нулеви емисии – механизъм, който вече е приложен успешно в Норвегия, Калифорния и другаде [13, 53]. Четвърто, относително малката единична мощност на тези съдове (обичайно от стотици киловати до няколко мегавата) съответства на текущото технологично равнище на морските горивно клетъчни системи [13, 14].

1.5 Цел, задачи и структура на изследването

Целта на изследването е да се извърши цялостен, критичен и систематизиран анализ на приложимостта на водорода като гориво при морския транспорт на къси разстояния, обхващащ пълната верига на стойността – от производството на водорода, през транспортирането, съхранението и бункероването му, до преобразуването му в полезна енергия на борда – и да се изведе многокритериална оценъчна рамка, приложима към конкретни маршрути и съдове в последващи практически изследвания.

За постигането на тази цел в настоящата първа част са формулирани следните задачи: (1) да се систематизират предходните изследвания и натрупаният демонстрационен опит с водородни плавателни съдове; (2) да се съпоставят типовете горивни клетки и алтернативните енергийни конвертори по критерии, релевантни за корабни приложения; (3) да се анализират производствените пътища на водорода и техният емисионен и икономически профил; (4) да се оценят формите за съхранение и доставка на водорода с оглед спецификата на късите маршрути; (5) да се изведат аналитичните зависимости за предварително оразмеряване на корабна водородна енергийна система.

В статията раздел 2 представя литературния обзор, типологията на горивните клетки и демонстрационния опит, раздел 3 анализира производствените пътища на водорода, раздел 4 – транспорта, доставката и формите за съхранение, раздел 5 систематизира изискванията към корабната енергийна система чрез аналитични зависимости и раздел 6 обобщава изводите. Екологичното, икономическото и регулаторното измерение, заедно с многокритериалната оценъчна рамка, са предмет на втора, свързана публикация.

2 Литературен обзор и демонстрационен опит

2.1 Предходни изследвания върху водородните горивни клетки в морски приложения

Научният интерес към водорода като морско гориво претърпя качествен скок през последното десетилетие. Мащабният ретроспективен анализ на Fan [13], обхващащ две десетилетия развитие на водородните кораби (2000–2024 г.), документира еволюцията от единични експериментални лодки с мощност от порядъка на киловати до търговски експлоатирани фериботи и проектни разработки с няколко мегавата, като установява, че

преобладаващата част от реализираните проекти устойчиво се намира именно в сегмента на късите маршрути – фериботи, екскурзионни и пътнически съдове, пристанищни и обслужващи плавателни средства [13]. Динамиката на този процес е илюстрирана на Фиг. 1: след 2020 г. секторът премина от единични експерименти към устойчив експоненциален растеж.



Фиг. 1. Динамика на водородните корабни проекти и съдове в периода 2000–2024 г. (по [13])

Обзорът на Kolodziejcki [23] върху водородно-базираните задвижващи системи систематизира технологичните конфигурации – чисто горивно клетъчни, хибридни с акумулаторни батерии и двигателни с вътрешно горене – и подчертава, че хибридизацията с батерии е практически задължителна за покриване на пиковите и преходните режими при корабна експлоатация. Echim and Budea [7] обобщават текущото състояние на водородната енергетика и горивните клетки в морски и индустриални приложения, като открояват зрелостта на PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) технологията и нарастващата роля на демонстрационните проекти за натрупване на експлоатационен опит.

Задълбочен преглед на аспектите на технологията, разходите и регулациите предлагат Fu, *et al.* [14], които установяват, че докато техническата осъществимост на горивно клетъчното корабно задвижване е доказана, основните бариери са икономически (висока специфична цена на инсталираната мощност и на горивото) и нормативни (липса на завършени международни правила за водорода като гориво) [15, 55]. Ранните европейски демонстрационни проекти – сред които плаващата лаборатория *Energy Observer*, първият сертифициран пътнически съд с водороден двигател *Hydroville* и поредицата проекти по програмите FLAGSHIPS, HySeas III и ShipFC – изиграха ролята на катализатори, като доказаха на практика интеграцията на горивни клетки, водородно съхранение и електрическо задвижване в реални корабни условия и формираха първоначалната база за класификационните правила [2, 7, 13, 14].

Специфично за морския транспорт на къси разстояния, Melideo and Desideri [34] изследват пълния и частичния ретрофит на Ro-Ro кораби с водородно гориво и показват, че частичната конверсия (спомогателни потребители и пристанищни режими) е икономически по-защитима като преходна стъпка. Ammar and Seddiek [1] моделират прехода на Ro-Pax към зелен и син водород и установяват значителен потенциал за намаляване на емисиите при управляеми разходи за конкретни фериботни линии. Mäkelä, *et al.* [32] оценяват приложимостта на водорода за круизен кораб и заключават, че при по-големите пътнически кораби водородът е приложим предимно за хотелен товар и частично покритие на задвижването, докато пълното водородно хранване остава предизвикателство поради обемните ограничения. Inal, *et al.* [20] демонстрират при кораб за генерални товари, че горивната клетка може да изпълнява функцията на корабен електрогенератор, замествайки спомогателните дизел-генератори и елиминирайки съответните емисии в пристанище. Тези изследвания очертават общ извод: колкото по-кратък е маршрутът и колкото по-предвидим е експлоатационният профил, толкова по-пълноценно водородът може да замени конвенционалното гориво.

Относно регионални проучвания Latapí, *et al.* [25] анализират възможностите и бариерите пред масово използване на водородните горивни клетки от скандинавските корабни компании и идентифицират като решаващи фактори публичната подкрепа, зелените обществени поръчки и координацията между пристанища, оператори и производители на гориво. Eklund, *et al.* [8] доказват осъществимостта на водородното гориво за вътрешния морски транспорт на Фиджи – пример за приложимост при островни и островни транспортни системи с къси разстояния. За българския контекст особена стойност има изследването на Pencheva and Asenov [38] върху водородната мобилност в България, което анализира предизвикателствата и възможностите за интегриране на водородни транспортни системи на примера на град Русе и извежда институционалните и инфраструктурните дефицити, но и потенциала на дунавския и черноморския транспортен коридор.

2.2 Типове горивни клетки: PEMFC, SOFC и MCFC

Горивната клетка е електрохимично устройство, което преобразува химичната енергия на горивото директно в електроенергия, без междинно топлинно стъпало, поради което не е ограничена от цикъла на Карно и достига по-висока ефективност от двигателите с вътрешно горене при съпоставими мощности [7, 14]. За морски приложения практическо значение имат три основни типа, чиито характеристики са съпоставени в Таблица 1.

Таблица 1

Сравнителни характеристики на основните типове горивни клетки за морски приложения (систематизирано по [7, 14, 23])

Показател	PEMFC	SOFC	MCFC
Работна температура, °C	60–90	600–1000	~650
Електрическа ефективност, %	45–60	50–65	45–55
Плътност на мощността	висока	средна	ниска
Време за пуск	секунди–минути	часове	часове

Показател	PEMFC	SOFC	MCFC
Динамика при променлив товар	отлична	ограничена	ограничена
Гориво	H ₂ (висока чистота)	H ₂ , NH ₃ , CH ₃ OH, CH ₄	H ₂ , CH ₄ и др.
Толерантност към примеси	ниска	висока	висока
Типично морско приложение	задвигване на фериботи, пътнически и пристанищни съдове	базов електрически товар при големи съдове	единични демонстрации

Протонно-обменна мембранна горивна клетки (PEMFC) работят при ниски температури (60–90 °C), използват полимерна електролитна мембрана и платинови катализатори и се отличават с висока плътност на мощността, бърз пуск и отлична динамика при променливи товари – качества, които ги правят предпочитания избор за фериботи, пътнически и пристанищни съдове с интензивно маневриране [7, 14, 29]. Електрическата им ефективност достига 45–60%, а ресурсът на съвременните стекове надхвърля 30 000 работни часа. Основните им ограничения са изискването за водород с висока чистота (99,97% и повече), чувствителността към замърсители като CO и H₂S и необходимостта от прецизно управление на влажността и топлината [14, 29]. Практически всички реализирани водородни съдове от последното десетилетие – включително MV Sea Change, 500-киловатовият китайски демонстрационен съд и норвежкият ферибот MF Hydra – използват именно PEMFC технология [13, 16, 53].

Твърдооксидните горивни клетки (SOFC) работят при високи температури (600–1000 °C) с керамичен електролит, което им позволява да използват освен водород и амоняк, метанол, природен газ и други горива с вътрешен или външен реформинг, като достигат електрическа ефективност от 50–65%, а при комбинирано оползотворяване на топлината – обща ефективност над 80% [7, 14]. Слабите им страни са бавният пуск (часове), ограничената устойчивост на термоциклиране и по-ниската плътност на мощността, поради което те са по-подходящи за покриване на базови електрически товари при по-големи съдове, отколкото за динамично задвигване на малки кораби на къси линии [14, 32]. Сравнителното моделиране на многогоривни SOFC системи за корабно задвигване с амоняк, метанол и водород потвърждава тяхната перспективност именно в ролята на стационарни бордови електроцентрали [7, 13].

Горивните клетки с разтопен карбонат (MCFC) работят при около 650 °C, толерантни са към горивни примеси и позволяват вътрешен реформинг, но ниската им плътност на мощността, значителната маса, дългият пуск и деградацията на електролита ограничават морското им приложение до единични демонстрации при големи съдове; за сегмента на късите разстояния те на практика не са конкурентоспособни [7, 14].

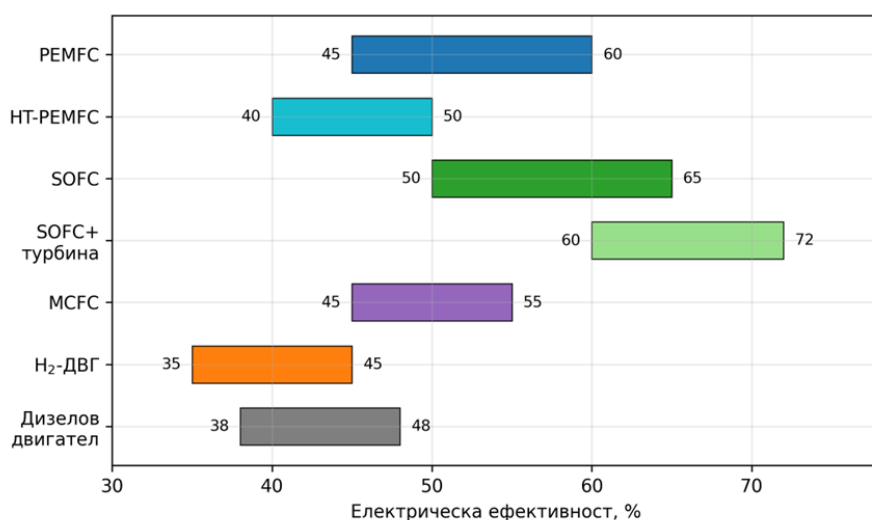
Диапазоните на електрическата ефективност на разглежданите енергийни конвертори са съпоставени на Фиг. 2, която откроява предимството на горивните клетки пред топлинните машини и потенциала на комбинираните SOFC-цикли.

За пълнота следва да се отбележи и водородният двигател с вътрешно горене (H₂-ICE), който използва утвърдена двигателна архитектура и е толерантен към чистотата на горивото, но отстъпва на горивните клетки по ефективност (35–45%) и генерира NO_x при високотемпературно горене [4, 23]. Двугоривните решения – например дизел-водородни

двигатели с впръскване на оксигенород или на богат на водород реформат – представляват преходни технологии, позволяващи частично намаляване на въглеродните емисии при съществуващи съдове [4, 23].

2.3 Демонстрационни проекти и реално експлоатирани съдове

Решаващият аргумент в полза на техническата зрялост на водородното корабоплаване са реално построените и експлоатирани съдове. Техните параметри са обобщени в Таблица 2, а най-показателните случаи заслужават самостоятелен анализ.



Фиг. 2 Диапазони на електрическата ефективност на корабните енергийни конвертори (систематизирано по [14, 26, 47, 55])

Таблица 2

Избрани реализирани и проектни водородни съдове за къси маршрути (по [13] и посочените в таблицата източници)

Съд / проект	Тип	Мощност на ГК	Съхранение на H ₂	Батерия	Статус	Източник
MV Sea Change (САЩ)	пътнически ферибот, 75 пътници	360 kW PEMFC	242 kg @ 250 bar	100 kWh	търговска експлоатация	[53]
MF Hydra (Норвегия)	автомобилен ферибот	2×200 kW PEMFC	течен H ₂	1,36 MWh	търговска експлоатация	
500 kW съд (Китай)	демонстрационен пътнически	500 kW PEMFC	240 kg @ 35 MPa	957 kWh	експлоатация	[16]
HyForce (Сингапур)	пристанищен влекач	PEMFC хибрид	компресиран H ₂	да	демонстрация	[35, 36]
Ферибот за Неаполитанския залив	пътнически ферибот	PEMFC	компресиран H ₂	да	проект	[5]
Водороден катамаран	Ro-Pax катамаран	PEMFC	компресиран H ₂	да	симулационен модел	[37]
Круизен кораб (Финландия)	круизен кораб	PEMFC/SOFC	LH ₂	да	предпроектно проучване	[32]

MV Sea Change е първият в света търговски пътнически ферибот със 100% водородно горивно клетъчно задвижване, въведен в редовна експлоатация в залива на Сан Франциско. Съдът е оборудван с РЕМ горивни клетки с обща мощност 360 kW, акумулаторна батерия от 100 kWh и съхранява 242 kg газообразен водород при налягане 250 bar в резервоари на горната палуба, което му осигурява до 300 морски мили пробег и приблизително 16 часа автономна работа. Изчерпателно документираният процес на проектиране, сертификация от Бреговата охрана на САЩ и въвеждане в експлоатация представлява безценен прецедент: той доказва, че действащата регулаторна система, макар и чрез процедура на алтернативно проектно одобрение, е способна да сертифицира изцяло водороден пътнически кораб.

500-киловатовият демонстрационен съд, описан от Guan [16], е най-мощният документиран в литературата плавателен съд с чисто РЕМ горивно клетъчно задвижване към момента на публикацията. Корабът с дължина 49,9 m съчетава горивни клетки с обща мощност 500 kW, литиево-железен фосфатна батерия от 957 kWh и 240 kg водород, съхраняван при 35 MPa, като изминава над 200 km с едно зареждане при скорост 28 km/h. Особено ценни са публикуваните експлоатационни данни за енергийното управление на хибридната система горивна клетка–батерия, демонстриращи стабилна съвместна работа при реални речно-крайбрежни условия.

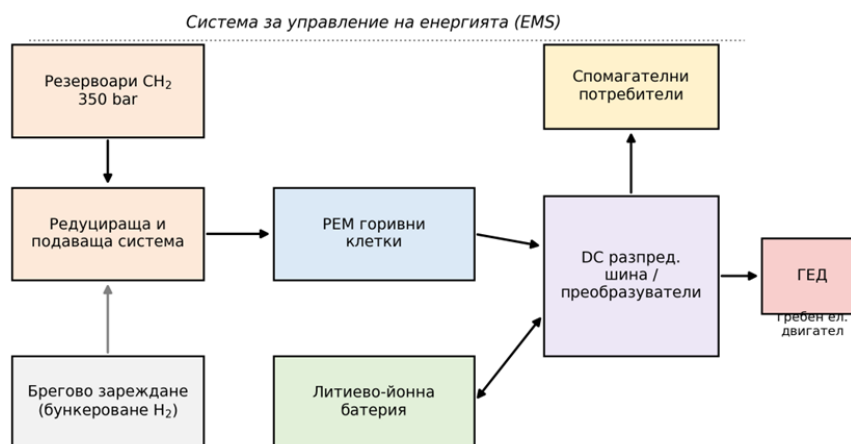
HyForce – водородният пристанищен влекач, разработен в Сингапур и анализиран от Menon and Chan [35] и Menon, *et al.* [36] – илюстрира приложимостта на водорода при съдове с рязко променлив товаров профил. Техничко-икономическата и екологичната оценка показва, че водородната версия елиминира локалните емисии при характерните за влекачите дълги периоди на готовност и кратки пикови натоварвания, а моделно управляваната система за енергиен мениджмънт на хибридната конфигурация оптимизира разпределението на мощността между горивните клетки и батерията.

Фериботните проектни разработки заемат централно място в литературата. Di Ilio, *et al.* [5] и съавтори проектират водороден ферибот за по-чист пътнически транспорт в Неаполитанския залив с детайлно оразмеряване на горивно клетъчната система, батерията и водородното съхранение спрямо реалния енергиен профил на маршрута. Micoli, *et al.* [37] моделират водороден ферибот- тип катамаран с нулеви емисии, в средата AVL Cruise-M и доказват адекватността на симулационния подход за предпроектна оценка на енергийния баланс. Rivarolo, *et al.* [44] извършват предпроектно проучване за пътнически корабчета с нулеви емисии за вътрешните водни пътища и извеждат критериите, при които водородните горивни клетки превъзхождат акумулаторните решения – по-дълги дневни пробези и невъзможност за често зареждане с електроенергия. Saadeldin [45] прилагат многокритериален анализ и смесено целочислено линейно програмиране за оценка на осъществимостта на водородни пътнически кораби, като формализират избора между алтернативните конфигурации.

Типовата архитектура на утвърдилата се хибридна конфигурация е представена на Фиг. 3.

Съвкупният демонстрационен опит позволява три обобщения. Първо, техническата осъществимост на водородното задвижване при съдове с мощност до около 1 MW и дневен енергиен разход до няколко мегаватчаса е доказана в реална търговска

експлоатация. Второ, всички реализирани решения са хибридни (горивна клетка + батерия) и използват PEM технология, което очертава фактическия индустриален стандарт за сегмента. Трето, критичният път на всеки проект минава не през корабната технология, а през бреговата инфраструктура за снабдяване с водород и през процедурите за одобрение – извод с пряко значение за оценъчната рамка.



Фиг. 3. Типова архитектура на хибридна корабна енергийна система горивна клетка–батерия с компресирано водородно съхранение (авторска схема по [16, 36, 53])

3 Производство на водород: технологии, класификация и емисионен профил

3.1 Цветова класификация на водорода

Фундаментална особеност при оценката на водорода като морско гориво е, че екологичната му стойност не е присъща на самата молекула, а се определя изцяло от производствения ѝ произход. Използваната в литературата и в индустриалната практика цветова класификация служи като условен, но удобен индикатор за въглеродния интензитет на производствения път [28, 50, 57].

Зеленият водород се произвежда чрез електролиза на вода с електроенергия от възобновяеми източници и представлява еталонния вариант за декарбонизация: при коректно гарантиран възобновяем произход на електроенергията емисиите по целия жизнен цикъл са минимални, ограничени до вградените емисии на съоръженията [28, 46]. Именно зеленият водород (и производните му) отговаря на дефиницията за RFNBO по смисъла на европейската регулаторна рамка и се ползва с най-благоприятно третиране по FuelEU Maritime [18, 28].

Сивият водород – понастоящем доминиращ в световното производство – се получава чрез паров реформинг на природен газ без улавяне на въглерода, с емисионен фактор от порядъка на 9–11 kg CO₂-екв./kg H₂, което го прави безсмислен от гледна точка на климатичните цели, макар и най-евтин (1–2,5 EUR/kg) [46, 50].

Синият водород съчетава реформинга с улавяне и съхранение на CO₂ (CCS); реалният му емисионен профил зависи критично от постигнатата степен на улавяне (типично 60–90%) и от изтичането на метан по веригата на природния газ, поради което литературата го третира като преходно, а не като крайно решение [1, 46, 50].

Тюркоазеният водород от пиролиза на метан с твърд въглерод като страничен продукт и **розовият водород** от електролиза с ядрена електроенергия разширяват палитрата от нисковъглеродни опции: технико-икономическата оценка на розов водород от малки модулни реактори за морски приложения показва конкурентоспособни разходи при висок коефициент на използване, което го прави релевантен за региони с ограничен възобновяем потенциал [43].

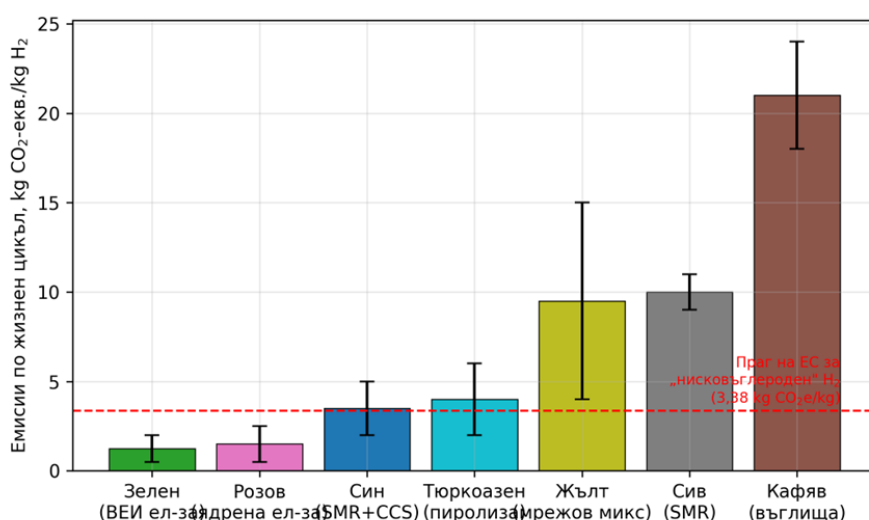
Кафявият/черният водород от газификация на въглища и **жълтият водород** от мрежова електроенергия с неопределен микс затварят класификацията откъм високоемисионния край [50].

Цветова класификация на водорода и ориентировъчни характеристики са представени в Таблица 3, а емисионните диапазони на производствените пътища са визуализирани на Фиг. 4 в съпоставка с приетия в европейската регулаторна практика праг за „нисковъглероден” водород.

Таблица 3

**Цветова класификация на водорода и ориентировъчни характеристики
(систематизирано по [1, 6, 28, 42, 46, 50])**

Тип	Суровина / процес	Емисии, kg CO ₂ -екв./kg H ₂	Ориенти- ръчна цена, EUR/kg	Роля в морската декарбонизация
Зелен	електролиза + ВЕИ	0,5–2	3,5–8	целев и дългосрочен вариант
Син	реформинг + CCS	2–5	2–4	преходен вариант
Тюркоазен	пиролиза на метан	2–6	2–4,5	развиваща се технология
Розов	електролиза + ядрена ел.	0,5–2,5	3–6	нисковъглероден базов вариант
Жълт	електролиза + мрежов микс	зависи от микса	3–7	условен
Сив	реформинг без CCS	9–11	1–2,5	несъвместим с целите
Кафяв/черен	газификация на въглища	18–24	1–2	несъвместим с целите



Фиг. 4. Емисии по жизнен цикъл на водорода по производствени пътища

От гледна точка на морския транспорт на къси разстояния класификацията има непосредствено практическо следствие: доколкото емисионните регулации (EU ETS, FuelEU Maritime) отчитат жизнения цикъл на горивото, изборът на доставчик и производствен път на водорода се превръща в неразделна част от проектното решение за даден маршрут, наравно с избора на корабна технология. Този извод се потвърждава и от оценките на жизнения цикъл при водородни плавателни съдове: анализите на въглеродния отпечатък при вътрешното корабоплаване [12, 19] и сравнителното изследване на кораб-казус спрямо конвенционална енергийна система [54] показват, че производственият път на водорода е определящ за общия емисионен профил на съда

3.2 Електролизни технологии

Електролизата на вода е ключовата технология за производство на зелен водород. Трите основни направления се различават съществено по зрялост, параметри и приложимост. **Алкалната електролиза (AEL)** е най-зрялата и капиталово най-евтина технология (CAPEX от порядъка на 500–1000 EUR/kW), с ефективност 60–70% и дълъг експлоатационен ресурс, но с ограничена динамика при променливо захранване, което я прави по-подходяща за работа с относително стабилен енергиен източник [46, 50].

Електролизата с протонообменна мембрана (PEM) предлага висока плътност на тока, компактност, бърза реакция на променлива мощност – качество, критично при директно съчетаване с ветрови или соларни мощности – и водород с висока чистота, срещу по-висок CAPEX (900–1500 EUR/kW) и употреба на благородни метали [46, 50].

Твърдооксидната електролиза (SOEC) работи при високи температури с ефективност, достигаща 80–90% при наличие на отпадна топлина, и представлява перспективното направление за интегрирани индустриално-пристанищни системи, макар да е в по-ранна фаза на комерсиализация [46, 50]. Sayer, *et al.* [46] съпоставят икономически и екологично различните производствени и транспортни конфигурации и установява, че при декарбонизиран електроенергиен източник електролизата доминира по съвкупен показател, като цената на електроенергията формира 60–80% от себестойността на водорода.

За пристанищните приложения интерес представлява и производството на водород от морска вода: прегледът на съвременните подходи за директна и индиректна електролиза на морска вода показва бърз научен напредък, а иновативни процесни схеми съчетават обезсоляване и втечняване на водород в единна енергийна система с корабен профил на потребление [50]. Тези направления, макар и още не индустриализирани, имат стратегическо значение за крайбрежните водородни хъбове, при които достъпът до сладка вода може да бъде ограничаващ фактор.

3.3 Реформинг, CCS и пиролиза

Паровият реформинг на метан (SMR) остава индустриалният гръбнак на световното водородно производство и неговата роля в морския преход зависи изцяло от съчетаването му с улавяне на въглерода. Според анализираната литература, дори при оптимистични допускания за степента на улавяне синият водород запазва остатъчен емисионен интензитет, който в дългосрочен план е несъвместим с нетната нула, но в

средносрочен план осигурява обемите и цените, необходими за първоначалното разгръщане на водородната логистика [1, 46, 50]. Показателно е, че редица оценки за Ro-Rax линии разглеждат сценарии със син водород именно като мост към зеления [1]. Пиролизата на метан, при която въглеродът се свързва в твърда форма с потенциална пазарна стойност, представлява технологично интригуваща алтернатива, но нейната морска релевантност засега е ограничена от ранната фаза на индустриализация [50].

Специфична за корабоплаването е и концепцията за бордово производство на водород. Изследвания върху оползотворяването на отпадната топлина на корабните двигатели за производство на водород на борда, върху проектирането на корабни парови реформери за метанол, както и върху бордовата декомпозиция на амоняк демонстрират принципната възможност водородът да бъде генериран на място от по-лесно съхраним носител [23, 50]. За късите маршрути обаче тези схеми добавят сложност, маса и разходи, които рядко са оправдани при наличието на ежедневен достъп до брегова инфраструктура – извод, който насочва бордовите реформинг-решения по-скоро към океанското корабоплаване [33].

3.4 Производство от морски възобновяеми източници и розов водород

Особен интерес за морския транспорт представляват производствените схеми, при които самата морска среда е енергийният източник. Pompodakis, *et al.* [42] моделират производството на водород от вълнови електроцентрали за зареждане на водородни кораби в Средиземно море и показват, че при подходящи вълнови ресурси островните пристанища могат да се превърнат в самодостатъчни водородни станции. Macingwane and Schönborn [31] извършват технико-икономически анализ на зеленото водородно производство от вълнова енергия като морско гориво и извеждат условията за ценова конкурентоспособност. Оценките за офшорни водородни вериги за доставка допълват картината откъм ветровата енергия [50]. В същата логика на диверсификация Pompodakis and Papadimitriou [43] оценяват розовия водород от малки модулни реактори за морски приложения и установяват, че при висок коефициент на натоварване той може да постигне себестойност, съпоставима със зеления водород при среден възобновяем ресурс. За черноморския контекст тези резултати имат ориентировъчна стойност: те показват, че изборът на производствен път следва да се основава на локалния енергиен ресурс, а не на универсални рецепти.

3.5 Икономика на производството и изводи за късите маршрути

Приведената себестойност на водорода (LCOH) е резултантна величина от цената на електроенергията (при електролиза), коефициента на използване на мощностите, капиталовите разходи и мащаба [6, 46]. Прогнозите на DNV в дългосрочния хоризонт до 2060 г. очертават устойчива низходяща траектория на разходите за зелен водород вследствие на поевтиняването на възобновяемата електроенергия и електролизаторите, като паритетът със синия водород се очаква през 30-те години на века в региони с добър възобновяем ресурс. За морския транспорт на къси разстояния изводите са три:

Първо, локалното пристанищно производство чрез електролиза е конкурентоспособно спрямо доставяния водород при къси логистични вериги, тъй като

елиминира транспортните и преобразователните загуби [30, 39, 46]. Второ, регулярният и предвидим профил на потребление на фериботните линии позволява висок коефициент на използване на електролизьора – решаващ фактор за ниска LCOH [39, 41]. Трето, комбинирането на корабното потребление с други пристанищни и градски потребители (влекачи, кранове, автобуси, индустрия) създава мащаб, който самостоятелната фериботна линия не може да осигури – аргумент в полза на хъбовия модел, разгледан по-долу и в [17, 40, 41].

4 Транспорт, доставка и съхранение на водорода

4.1 Вериги на доставка до пристанището

Доставката на водорода от мястото на производство до бункеровъчния пункт може да се осъществи по няколко алтернативни пътя, чиито разходни и емисионни профили се различават съществено. Систематичният анализ на Lipiäinen, *et al.* [30] върху транспортните опции за голям индустриален потребител – методологически напълно приложим към пристанищен хъб – установява, че при малки обеми и къси разстояния автомобилният превоз на компресиран водород е най-гъвкавото решение, при средни обеми и разстояния предимство добиват превозите на течен водород, а при големи постоянни потоци тръбопроводният транспорт е без алтернатива по себестойност. Sayer, *et al.* [46] достигат до сходна йерархия, като подчертават, че всяко преобразуване на агрегатното състояние (компресиране, втечняване, хидрогениране на носител) внася енергийни загуби от 10 до 35%, които се отразяват както в цената, така и в емисионния баланс през целия жизнен цикъл (*well-to-wake*).

Международните вериги с превоз на течен водород по море са обект на нарастващо внимание: Singh and Viswanathan [49] моделират технико-икономически танкерите за течен водород, извеждайки икономии от мащаба и компромисите между CAPEX, OPEX и изпарителните загуби, а анализът на жизнения цикъл на далечно превозния течен водород от Африка до Германия на Kanz, *et al.* [21] показва, че транспортното звено може да добави съществен въглероден отпечатък при неоптимизирани вериги.

Тези резултати имат за късите маршрути преди всичко сравнителна стойност: те открояват структурното предимство на локалното производство, при което цялата преобразователно-транспортна верига се свива до минимум. Lanni, *et al.* [24] демонстрират този принцип чрез технико-икономическа оценка на зелена верига за течен водород за корабно зареждане, при която производството, втечняването и бункероването са интегрирани на едно място.

4.2 Форми на съхранение на борда

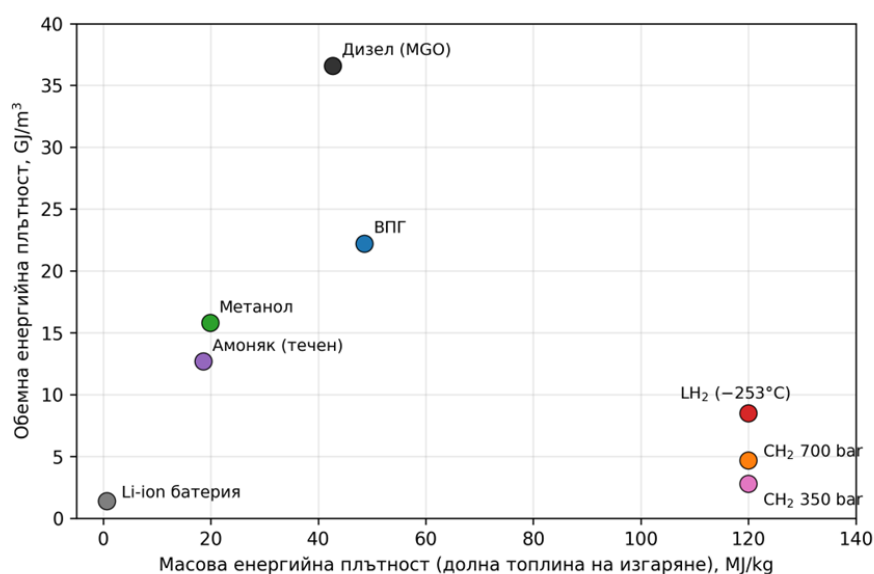
Изборът на форма за съхранение на водорода на борда е централното проектно решение при водородния кораб, тъй като определя обемния баланс, масовия баланс, концепцията за безопасност и логистиката на зареждането. Сравнителните характеристики са обобщени в Таблица 4. Фундаменталният компромис е илюстриран на Фиг. 5: водородът доминира по масова енергийна плътност, но дори в най-плътните си форми отстъпва многократно на конвенционалните горива по обемна плътност.

Компресираният газообразен водород (CH_2) при налягания 350 или 700 bar е технологично най-простото и индустриално най-зрялото решение, използвано в преобладаващата част от реализираните съдове. Обзорът на Li, *et al.* [29] върху приложението на компресирания водород в морски горивно клетъчни системи систематизира типовете резервоари (I–IV), като за корабни цели практическо значение имат композитните типове III и IV с работни налягания до 70 MPa. Предимствата – простота, бързо зареждане, липса на криогенна техника – се заплащат с ниска обемна плътност ($23\text{--}39 \text{ kg/m}^3$), която ограничава приложението до съдове с умерена дневна енергийна потребност - точно профилът на късите маршрути [14, 33].

Таблица 4

Сравнение на формите за съхранение на водород и водородни носители на борда

Форма	Обемна плътност на H_2 , kg/m^3	Условия	Основни предимства	Основни ограничения	Приложимост при къси маршрути
CH_2 350 bar	~23	35 MPa, околна t°	простота, зрялост, бързо зареждане	голям обем	висока
CH_2 700 bar	~39	70 MPa, околна t°	по-добра плътност	по-скъпи резервоари и компресия	висока
LH_2	~70	-253°C	висока плътност	криогеника, boil-off, цена	средна
Крио-компресиран	70–80	-230°C , 30 MPa	най-висока плътност	двойна сложност	ниска (перспективна)
Метални хидриди	до 100–150 (система: ниска)	ниско налягане	безопасност	маса, топлообмен	нишова
Амоняк (носител)	121 (H_2 в NH_3)	-33°C или 8–10 bar	зряла логистика	токсичност, крекинг	ограничена
LOHC	~57	околни условия	безопасно манипулиране	дехидрогениране, енергоемкост	ограничена
Метанол (носител)	~100 (H_2 в CH_3OH)	околни условия	течно гориво, зряла логистика	съдържа въглерод, реформинг	косвена



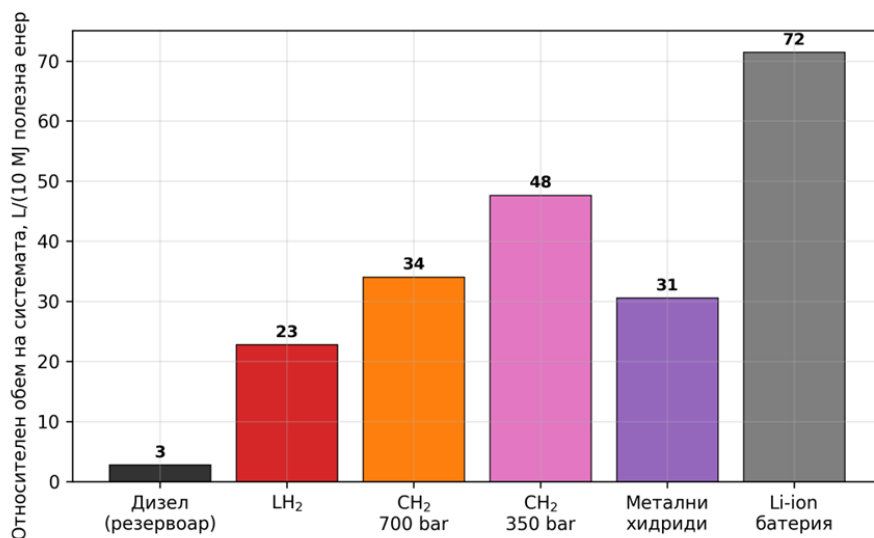
Фиг. 5 Масова и обемна енергийна плътност на морските горива и енергоносители (систематизирано по [26, 41, 47])

Течният водород (LH₂) при $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ утроява обемната плътност ($\sim 70\text{ kg/m}^3$ за самата течност), но изисква криогенни резервоари с високоефективна изолация, управление на изпарителния газ (boil-off) и материали, съхраняващи жилавост при криогенни температури [49]. Структурната оценка на независим резервоар тип С за течен водород извършена от Cha, et al. [3] демонстрира проектната методология за морски LH₂ резервоари съобразно кодовете на ИМО, а изчерпателният преглед на Kim and Chun [22] върху материалната съвместимост и стандартите за безопасност при системи за съхранение на течен водород извежда критичните въпроси на водородната крехкост, термичните напрежения и незавършената нормативна база. Норвежкият ферибот MF Hydra доказва експлоатационната жизнеспособност на LH₂ при къси маршрути, но общата оценка в литературата е, че течният водород е оправдан при по-висока енергийна потребност, докато за типичните фериботни и пристанищни приложения компресиранят водород остава по-практичен [53]. Безопасността при съхранението на борда е обект и на самостоятелни изследвания: числените анализи на изтичането, дифузията и вентилацията на водород в корабни помещения [27] и формализираните методи за анализ на риска чрез размити дървета на отказите [19] осигуряват количествена основа за разработване на концепцията за безопасност.

Металните хидриди предлагат съхранение при ниски налягания с висока обемна плътност и присъщо високо ниво на безопасност, но значителната им маса и топлинното управление при зареждане/разреждане ги насочват към нишови приложения; предложението от Lázár, et al. [26] нов метод за хидридно съхранение за морски цели илюстрира посоката на развитие.

Крио-компресиранят водород комбинира предимствата на двата основни подхода, но добавя тяхната съчетана сложност и остава в пред комерсиална фаза [50].

Практическото следствие от компромиса с плътността – необходимият обем на системата за съхранение за единица полезна енергия при отчитане на ефективността на конвертора – е съпоставено на Фиг. 6.



Фиг. 6 Относителен обем на системата за съхранение за единица полезна енергия на вала

4.3 Водородни носители: амоняк, ЛОНС и метанол

Водородните носители решават проблема на съхранението, но на цената на допълнителни преобразователни стъпала. Систематичната оценка на Van Rheenen, *et al.* [52] върху водородните носители за корабно задвижване при нулеви емисии с PEM горивни клетки съпоставя амоняка, течните органични носители (ЛОНС), метанола и борохидрида на натрия по критериите обемна ефективност, енергийни загуби, токсичност и технологична зрялост, като заключава, че нито един носител не доминира универсално и изборът е функция на маршрутният профил. Амонякът предлага зряла глобална логистика и висока обемна плътност на водорода, но токсичността му поставя тежки изисквания при пътнически кораби, а бордовият крекинг за захранване на PEM клетки внася загуби от 15–25% [48, 51]. ЛОНС позволяват съхранение при околни условия в конвенционални резервоари, но ендотермичното дехидрогениране изисква значителна топлинна мощност на борда. Метанолът като косвен водороден носител е течен при околни условия и логистически безпроблемен, но съдържа въглерод и екологичната му стойност зависи от произхода на CO₂ при синтеза. Общият извод за сегмента на транспорт на къси разстояния е еднозначен: при ежедневен достъп до брегова инфраструктура директното съхранение на водород (компресиран, при големи потребности – течен) превъзхожда носителите, чиято ниша са дългата автономност и глобалните вериги.

5 Аналитични зависимости за предварително оразмеряване

Изводите от анализираната литература позволяват формализиране на инженерната процедура за предварително оразмеряване на водородна енергийна система на плавателен съд за маршрут на къси разстояния – аналитичен модел, който свързва експлоатационния профил с масово-обемния и мощностния баланс на съда [5, 16, 36, 53].

Енергийната потребност на един експлоатационен цикъл се определя чрез интегриране на мощностния профил по времето на прехода:

$$E_{\text{екс.цикл}} = \int_0^T P(t) dt = \sum_{i=1}^k P_i \cdot \Delta t_i, \quad (1)$$

където: P_i е средната мощност на пропульсивната и спомагателната уредба в i -тия експлоатационен режим (маневриране, преход, престой), kW; Δt_i – продължителността на режима, h; T – общата продължителност на експлоатационния цикъл, h; k – броят на режимите.

Дневната енергийна потребност при n експлоатационен цикли дневно и коефициент на експлоатационен резерв k_p (обичайно 1,15–1,30 за отчитане на хидрометеорологични условия) е:

$$E_{\text{ден}} = k_p \cdot n \cdot E_{\text{екс.цикл}} \quad (2)$$

Необходимата маса водород между две бункерования през интервал τ (в денонощия) се определя от енергийния баланс на горивноклетъчната система:

$$m_{H_2} = \frac{\tau \cdot E_{\text{ден}}}{\eta_{ГК} \cdot LHV_{H_2}} \quad (3)$$

където: $\eta_{ГК}$ е средноексплоатационната ефективност на горивноклетъчната система (0,45–0,55 за PEMFC съгласно [14, 26, 56]; $LHV_{H_2} = 33,33$ kWh/kg – долната топлина на изгаряне на водорода.

Обемът на системата за съхранение следва от плътността на избраната форма:

$$V_{\text{съхр}} = \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2} \cdot k_{об}} \quad (4)$$

където: ρ_{H_2} е плътността на водорода в избраната форма (23 kg/m³ при 350 bar; 39 kg/m³ при 700 bar; 70 kg/m³ за LH₂ [26, 41]); $k_{об} = 0,4$ –0,6 – коефициент на обемно оползотворяване на системата, отчитащ конструкцията на резервоарите, арматурата и междините.

Разпределението на мощността в хибридна конфигурация се представя чрез следния баланс:

$$P_{\text{тов}}(t) = P_{\text{ГК}}(t) + P_{\text{бат}}(t), \quad P_{\text{ГК}}^{\min} \leq P_{\text{ГК}}(t) \leq P_{\text{ГК}}^{\text{ном}} \quad (5)$$

където горивната клетка покрива базовия товар в оптималния си диапазон (типично 30–80% от номинала за минимизиране на деградацията), а батерията поема пиковите и рекуперацията; капацитетът ѝ се оразмерява от най-тежкия маневрен цикъл [16, 45, 53].

Съпоставимостта на горивните алтернативи по разходен показател се осигурява чрез приведената цена на енергията на вала:

$$LCOE_{\text{вал}} = \frac{CAPEX \cdot CRF + OPEX_{\text{год}} + c_{H_2} \cdot M_{H_2, \text{год}}}{E_{\text{вал, год}}} \quad (6)$$

където: $CRF = \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1}$ е факторът на възстановяване на капитала при дисконтова норма r и срок N ; c_{H_2} – цената на водорода, EUR/kg; $M_{H_2, \text{год}}$ – годишното потребление, kg; $E_{\text{вал, год}}$ – годишната полезна енергия, kWh.

Илюстративно приложение на (1)–(4): пътнически ферибот с $E_{\text{рейс}} = 300$ kWh, $n = 8$ рейса дневно, $k_p = 1,2$ и ежедневно бункероване ($\tau = 1$) изисква при $\eta_{\text{ГК}} = 0,50$ маса водород $m_{H_2} = 2880 / (0,50 \cdot 33,33) \approx 173$ kg, което при 350 bar и $k_{об} = 0,5$ съответства на $V_{\text{съхр}} \approx 15$ m³ – обем, съизмерим с реализираните решения на MV Sea Change (242 kg) и потвърждаващ реалистичността на подхода [16, 53].

6 Заключение

Извършеният анализ обосновава следните изводи.

Първо, техническата осъществимост на водородното задвижване при съдове с мощност до 1–2 MW е доказана в търговска експлоатация, като фактическият индустриален стандарт на сегмента е хибридната конфигурация РЕМ горивна клетка–батерия с компресирано съхранение при 350 bar.

Второ, екологичната стойност на решението се определя изцяло от производствения произход на водорода, което прави сертифицирания нисковъглероден произход и късата логистична верига – оптимално локална пристанищна електролиза – неотменими елементи на проектното решение.

Трето, формите за съхранение образуват ясна йерархия за късите маршрути: компресиран водород за типичните фериботни и пристанищни приложения, течен водород при повишена автономност, носители – само при специфични логистични ограничения.

Четвърто, изведеният аналитичен апарат (1)–(6) прави практически приложимо предварителното оразмеряване и осигурява методическата връзка към втората част на изследването, в която се разглеждат екологичното и икономическото измерение, безопасността, регулаторната рамка и многокритериалната оценъчна рамка за приложимост при конкретен маршрут.

Използвана литература

1. Ammar NR., Seddiek IS. Sustainability and Economic Viability: Transitioning RORO Pax Ships to Green and Blue Hydrogen Fuels. Sustainability. 2026;18(2):885.
2. Bionda A., Pirrone L., Sakellariadis N., Boonen EJ. Sustainable Waterborne Transportation with Hydrogen: An Ecosystem Approach to Design. Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Maritime Applications. Cham: Springer; 2025.
3. Cha SJ., Tak HJ., Hwang BK., Lee JP., Kim JH., Lee JM. Structural Assessment of Independent Type-C Liquid Hydrogen Fuel Tank. Journal of Marine Science and Engineering. 2025;13(4):730.
4. Dere C., Inal OB. Comparative Evaluation of Hydrogen with Other Conventional and Alternative Marine Fuels. Transactions on Maritime Science. 2025;14(3).
5. Di Ilio G., Bionda A., Ponzini R., Salvatore F., Cigolotti V., Minutillo M., Georgopoulou C., Mahos K. Towards the design of a hydrogen-powered ferry for cleaner passenger transport. International Journal of Hydrogen Energy. 2024;95:1261-73.
6. DNV. Energy Transition Outlook 2026 – Hydrogen to 2060: From pilots to scale for renewable and low-carbon hydrogen and synthetic fuels. Høvik: DNV; 2026.
7. Echim SM., Budea S. Use of Hydrogen Energy and Fuel Cells in Marine and Industrial Applications–Current Status. Hydrogen. 2025;6(3):50.
8. Eklund T., Fredén A., Reddy A., Malmquist A., Prasad R., Charan D. Feasibility of hydrogen fuel in Fiji's domestic maritime transport sector. Energy. 2026;346:140236.
9. EU. Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of energy from renewable sources (RED III). Official Journal of the European Union. 2023;L series:1-77.
10. EU. Regulation (EU) 2023/1804 on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR). Official Journal of the European Union. 2023;L 234:1-47.
11. EU. Regulation (EU) 2023/1805 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport (FuelEU Maritime). Official Journal of the European Union. 2023;L 234:48-100.
12. Evers VHM., Kirkels AF., Godjevac M. Carbon footprint of hydrogen-powered inland shipping: Impacts and hotspots. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023;185:113629.
13. Fan H. Two decades of hydrogen-powered ships (2000–2024): Evolution, challenges, and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025;219:115878.
14. Fu Z., Lu L., Zhang C., Xu Q., Zhang X., Gao Z., Li J. Fuel cell and hydrogen in maritime application: A review on aspects of technology, cost and regulations. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2023;57:103181.

15. Georgopoulou C. On the identification of regulatory gaps for hydrogen as maritime fuel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2025;75:104224.
16. Guan W. A 500 kW hydrogen fuel cell-powered vessel: From concept to sailing. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;89:1466–81.
17. Holder D., Percy SD., Yavari A. A Review of Port Decarbonisation Options: Identified Opportunities for Deploying Hydrogen Technologies. *Sustainability*. 2024;16(8):3299.
18. Inal OB. Decarbonization of shipping: Hydrogen and fuel cells legislation in the maritime industry. *Brodogradnja*. 2024;75(2):75205.
19. Inal OB., Senol YE. Hydrogen powered ships: Risk analysis by using Intuitionistic Fuzzy Fault Tree Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2026;198:152781.
20. Inal OB., Zincir B., Dere C., Charpentier JF. Hydrogen Fuel Cell as an Electric Generator: A Case Study for a General Cargo Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(3):432.
21. Kanz O., Bittkau K., Ding K., Rau U., Reinders A. Life Cycle Global Warming Impact of Long-Distance Liquid Hydrogen Transport from Africa to Germany. *Hydrogen*. 2023;4(4):760–73.
22. Kim MS., Chun KW. A Comprehensive Review on Material Compatibility and Safety Standards for Liquid Hydrogen Cargo and Fuel Containment Systems in Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(10).
23. Kolodziejski M. Review of hydrogen-based propulsion systems in the maritime sector. *Archives of Thermodynamics*. 2023;44(4):335–80.
24. Lanni D., Cicco G., Minutillo M., Cigolotti V., Perna A. Techno-economic assessment of a green liquid hydrogen supply chain for ship refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;97:104–16.
25. Latapí M., Davíðsdóttir B., Jóhannsdóttir L. Drivers and barriers for the large-scale adoption of hydrogen fuel cells by Nordic shipping companies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(15):6099–119.
26. Lázár M., Mihálik I., Brestovič T., Jasminská N., Tóth L., Dobáková R. A Newly Proposed Method for Hydrogen Storage in a Metal Hydride Storage Tank Intended for Maritime and Inland Shipping. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023;11(9).
27. Lee CY., Park SK. Numerical Study on the Characteristics of Hydrogen Leakage, Diffusion and Ventilation in Ships. *Energies*. 2025;18(2):448.
28. Li C., Guo W., Wang J. Green Hydrogen For Maritime Decarbonization Carbon Neutralization. 2026;5:70128.
29. Li JC., Xu H., Zhou K., Li JQ. A review on the research progress and application of compressed hydrogen in the marine hydrogen fuel cell power system. *Heliyon*. 2024;10:25304.
30. Lipiäinen S., Sillman J., Vakkilainen E., Soukka R., Tuomaala M. Hydrogen transport options for a large industrial user: Analysis on costs, efficiency, and GHG emissions in steel mills. *Sustainable Production and Consumption*. 2024;44:1–13.

31. Macingwane Z., Schönborn A. Techno-Economic Analysis of Green Hydrogen Production as Maritime Fuel from Wave Energy. *Energies*. 2024;17(18):4683.
32. Mäkelä M., Niemi S., Nuortila C., Nyystilä L. Applicability of Hydrogen Fuel for a Cruise Ship. *Clean Technologies*. 2025;7(1):6.
33. McKinlay CJ., Turnock SR., Hudson DA., Manias P. Hydrogen as a deep sea shipping fuel: Modelling the volume requirements. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;69:863–73.
34. Melideo D., Desideri U. The use of hydrogen as alternative fuel for ship propulsion: A case study of full and partial retrofitting of roll-on/roll-off vessels for short distance routes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50:1045–55.
35. Menon NV., Chan SH. Technoeconomic and environmental assessment of HyForce, a hydrogen-fuelled harbour tug. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(11):6924–35.
36. Menon NV., Nguyen VB., Quek R., Kang CW., Zhang B., Chan SH. Modelling guided energy management system for a hydrogen-fuelled harbour tug. *Energy Conversion and Management: X*. 2024;23:100642.
37. Micoli L., Coppola T., Russo R., Sorrentino V. Modeling a Zero-Emissions Hydrogen-Powered Catamaran Ferry Using AVL Cruise-M Software. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(5):770.
38. Pencheva V., Asenov A. Hydrogen Mobility in Bulgaria—Analysis of the Challenges, Prospects and Opportunities for Integration of Transport Systems (Case Study from the City of Ruse. *World Electric Vehicle Journal*. 2026;17(2):100.
39. Pivetta D. A multi-objective planning tool for the optimal supply of green hydrogen for an industrial port area decarbonization. *Renewable Energy*. 2024;232:120979.
40. Pivetta D., Dall'Armi C., Sandrin P., Bogar M., Taccani R. The role of hydrogen as enabler of industrial port area decarbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;189:113912.
41. Pivetta D., Volpato G., Carraro G., Dall'Armi C., Lio L., Lazzaretto A., Taccani R. Optimal decarbonization strategies for an industrial port area by using hydrogen as energy carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;52:1084–103.
42. Pompodakis EE., Orfanoudakis GI., Katsigiannis YA., Karapidakis ES. Hydrogen Production from Wave Power Farms to Refuel Hydrogen-Powered Ships in the Mediterranean Sea. *Hydrogen*. 2024;5(3):494–518.
43. Pompodakis EE., Papadimitriou T. Techno-Economic Assessment of Pink Hydrogen Produced from Small Modular Reactors for Maritime Applications. *Hydrogen*. 2025;6(3):47.
44. Rivarolo M., Montagna GN., Lamberti T., Barberis S. A feasibility study for zero-emission passenger boats for inland waterways based on hydrogen fuel cells. *Proceedings of ECOS 2024*; 20242024.
45. Saadeldin M. Feasibility analysis of hydrogen fuel cell-powered passenger vessels: a multi-criteria and MILP-based analysis for sustainable inland navigation. *Ocean Engineering*. 2026;349:124186.

46. Sayer M., Ajanovic A., Haas R. Economic and environmental assessment of different hydrogen production and transportation modes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;65:626–38.
47. Shangguan Y., Tian X., Pang KW., Ruan Q., Jin Y., Wang S. Navigating the green shipping: Stochastic hydrogen hub deployment in inland waterways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024;129:104126.
48. Shi J., Zhu Y., Feng Y., Yang J., Xia C. A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines. *Atmosphere*. 2023;14(3):584.
49. Singh K., Viswanathan S. Techno-economic modelling of liquid hydrogen tankers: Capex, Opex, scale economies, and emission trade-offs. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2026;204:153259.
50. Tasleem S. Navigating the hydrogen prospect: A comprehensive review of sustainable source-based production technologies, transport solutions, advanced storage mechanisms, and CCUS integration. *Journal of Energy Chemistry*. 2024;97:166–215.
51. Van Rheenen E., Scheffers E., Zwaginga J., Visser K. Hazard Identification of Hydrogen-Based Alternative Fuels Onboard Ships. *Sustainability* [Internet]. 2023; 15(24):[16818 p.].
52. Van Rheenen ES., Padding JT., Slootweg JC., Visser K. Hydrogen carriers for zero-emission ship propulsion using PEM fuel cells: an evaluation. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2024;23(3):166-83.
53. Van Sickle E., Ralli P., Pratt JW., Klebanoff LE. MV Sea Change: The first commercial 100% hydrogen fuel cell passenger ferry in the world. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025;105:389–404.
54. Wang H., Aung MZ. Life Cycle Analysis of Hydrogen Powered Marine Vessels—Case Ship Comparison Study with Conventional Power System. *Sustainability*. 2023;15(17):12946.
55. Wang Z., Li M., Zhao F., Ji Y., Han F. Status and prospects in technical standards of hydrogen-powered ships for advancing maritime zero-carbon transformation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;62:925–46.
56. Wang Z., Zhao F., Dong B., Wang D., Ji Y., Cai W., Han F. Life cycle framework construction and quantitative assessment for the hydrogen fuelled ships: A case study. *Ocean Engineering*. 2023;281:114740.
57. Zhaka V., Samuelsson B. Hydrogen as fuel in the maritime sector: From production to propulsion. *Energy Reports*. 2024;12:5249–67.
58. Zincir BA. Hydrogen as a Maritime Fuel: Navigating Technical, Safety, and Regulatory Challenges. *Sustainable Maritime Transportation*. 2025;4.