



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.15>

Д. О. Шалапко¹, Н. В. Гречка²

¹ Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

² Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4311-3908> – Д. О. Шалапко

<https://orcid.org/0009-0007-9310-7614> – Н. В. Гречка

✉ denys.shalapko@nuos.edu.ua

СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ ЯК ДОМІШКИ ДО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Проблема. У сучасних дослідженнях суднових двигунів внутрішнього згоряння розглядаються різні варіанти використання водню як добавки до основного палива, зокрема в якості мікродомішки для покращення експлуатаційних та екологічних показників. Водночас фізико-хімічні властивості водню формують новий профіль пожежо- та вибухопожежної небезпеки машинного відділення, пов'язаний із витоками, швидкою дифузиею та накопиченням газоповітряних сумішей. Існуючі підходи не забезпечують узгодженої ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки саме для дизельних суднових енергетичних установок (СЕУ) з водневою домішкою.

Мета. Розроблення сценарно- та ризик-орієнтованої методики оцінювання пожежної безпеки суднових енергоустановок при впровадженні водню як добавки до дизельного палива.

Методи. Застосовано сценарний аналіз із формуванням типових аварійних сценаріїв S1–S4 (мікротоки без/з займанням, масовані витоки з негайним займанням та за неефективною вентиляцією). Для кількісної оцінки використано систему критеріїв: умовна ймовірність займання, інтенсивність теплового потоку, час досягнення граничних температур і час збереження функціональності критичних систем. Узагальнення виконано за матрицею «ймовірність–наслідки» та інтегральним показником пожежної небезпеки.

Результати. Показано, що без спеціальних заходів інтеграція водню призводить до зростання пожежного ризику за рахунок сценаріїв масованих витоків. Запропонований інтегральний показник дозволяє порівняльно оцінювати конфігурації СЕУ та кількісно обґрунтовувати ефективність вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань і конструктивного теплозахисту. Продемонстровано зниження інтегрального ризику до рівня, близького до традиційної дизельної СЕУ, за умови комплексної оптимізації.

Висновки. Розроблена методика забезпечує системний перехід від якісної оцінки небезпек до інженерно обґрунтованого управління пожежним ризиком у двопаливних суднових енергоустановках і може застосовуватися на етапах проектування та модернізації з урахуванням вимог пожежної безпеки. У роботі розглянуто не спалювання водню як самостійного палива, а використання його малої домішки до дизельного палива в кількості до 0,1 % за масою, що вводиться безпосередньо у паливопровід високого тиску перед форсункою. За такого підходу змінюється конфігурація потенційних пожежонебезпечних зон і виникає потреба в окремому ризик-орієнтованому оцінюванні пожежної безпеки суднової енергоустановки.

Ключові слова: пожежна безпека, суднова енергоустановка, водень, сценарний аналіз, ризик-орієнтована оцінка, вентиляція, газодетекція.

SCENARIO-ORIENTED APPROACH TO ASSESSING FIRE SAFETY OF SHIP POWER PLANTS USING HYDROGEN AS AN ADDITIVE TO DIESEL FUEL

Problem. Current research on marine internal combustion engines explores various options for using hydrogen as a fuel additive, particularly as a micro-impurity to enhance operational and environmental performance. At the same time, the physicochemical properties of hydrogen create a new fire and explosion hazard profile in the engine room, associated with leaks, rapid diffusion, and the accumulation of gas-air mixtures. Existing approaches do not provide a coherent risk-oriented fire safety assessment specifically for diesel marine power plants using hydrogen additives.

Objective. To develop a scenario- and risk-oriented methodology for assessing the fire safety of marine power plants when implementing hydrogen as a diesel fuel additive.

Methods. Scenario analysis was applied, involving the formulation of typical accident scenarios S1–S4 (micro-leaks with/without ignition, massive leaks with immediate ignition, and leaks under ineffective ventilation). A system of criteria was used for quantitative assessment: conditional ignition probability, heat flux intensity, time to reach threshold temperatures, and the duration of functional integrity for critical systems. The generalization was performed using a “probability-consequence” matrix and an integral fire hazard index.

Results. It is shown that without special measures, hydrogen integration leads to an increase in fire risk due to massive leak scenarios. The proposed integral index allows for a comparative assessment of marine power plant configurations and provides a quantitative basis for the effectiveness of ventilation, gas detection, automatic interlocks, and structural thermal protection. A reduction in integral risk to a level close to traditional diesel power plants was demonstrated under the condition of comprehensive optimization.

Conclusions. The developed methodology ensures a systematic transition from qualitative hazard assessment to engineering-based fire risk management in dual-fuel marine power plants and can be applied during the design and modernization stages in compliance with fire safety requirements. This study considers the use of a small hydrogen additive (up to 0.1 % by mass) introduced directly into the high-pressure fuel line before the injector, rather than the combustion of hydrogen as a standalone fuel. This approach changes the configuration of potential fire-hazardous zones and necessitates a separate risk-oriented fire safety assessment of the marine power plant.

Key words: fire safety; ship power plant; hydrogen; scenario analysis; risk-oriented assessment; ventilation; gas detection.

Постановка проблематики дослідження. У сучасних дослідженнях суднових двигунів внутрішнього згоряння та суднових енергетичних установках (СЕУ) розглядаються різні варіанти використання водню як добавки до основного палива, зокрема в якості мікродомішки для покращення експлуатаційних та екологічних показників [5]. Для суднових енергоустановок такі рішення становлять інтерес передусім як окремий клас технічних модифікацій паливної системи та робочого процесу двигуна. Однак інтеграція водневої підсистеми, навіть за малих витрат H_2 , призводить до появи додаткових джерел пожежної та вибухопожежної небезпеки, пов'язаних із витоками газу, його накопиченням у локальних зонах машинного відділення та можливим займанням [5, 6]. При цьому предметом розгляду не є повномасштабне використання водню як окремого моторного палива. Дослідження стосується режиму мікродозування водню як добавки до дизельного палива, орієнтовно до 0,1 % за масою, при введенні у паливопровід високого тиску перед форсункою. Така схема принципово відрізняється від подачі водню

у впускний тракт, оскільки не передбачає формування значних об'ємів попередньо змішаних воднево-повітряних сумішей у впускній системі.

Разом з тим, фізико-хімічні властивості водню – низька енергія займання, широкий діапазон концентрацій займистості, висока швидкість полум'я та схильність до швидкої дифузії – зумовлюють формування принципово нового профілю пожежота вибухонебезпеки суднових енергоустановок [3, 10]. На відміну від традиційних рідких палив, водень у разі витоку швидко утворює газоповітряні суміші, здатні накопичуватися у верхніх зонах машинного відділення та локальних «кишенях», що істотно ускладнює прогнозування розвитку аварійних подій [7, 9]. Додатковим фактором ризику є поєднання водневої підсистеми з наявними джерелами займання у машинному відділенні – гарячими поверхнями, електрообладнанням і системами випуску відпрацьованих газів [1, 4].

Аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень двопаливного режиму «дизель– H_2 » зосереджені на оцінюванні ефективності, токсичності та стабільності згоряння, тоді як питання

пожежної безпеки розглядаються фрагментарно або опосередковано, без формалізації критеріїв ризику та запасу вогнестійкості елементів суднової енергоустановки [11, 13]. Водночас роботи, присвячені пожежній безпеці водневих систем, здебільшого орієнтовані на стаціонарні об'єкти або судна з паливними елементами і не враховують специфіку двопаливного дизельного двигуна як джерела високотемпературних і термомеханічних навантажень [7, 8].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення цілісного підходу, який поєднує аналіз робочого процесу дизельного двигуна у режимі «дизель– H_2 » зі сценарним та ризик-орієнтованим оцінюванням пожежної небезпеки суднової енергоустановки. Такий підхід має забезпечити науково обґрунтований вибір конструктивно-технологічних рішень і систем пожежного захисту при інтеграції водню у суднові енергоустановки з урахуванням міжнародних нормативних вимог і risk-based методик [1, 7].

Сучасний стан наукових досліджень і нормативних підходів. Сучасні наукові дослідження двопаливного режиму роботи дизельних двигунів із водневою добавкою переважно зосереджені на оцінюванні показників ефективності, токсичності відпрацьованих газів та особливостей процесу згоряння [11, 13]. Експериментальні та розрахункові роботи показують, що введення водню здатне скорочувати затримку займання, зміщувати фазування тепловиділення в бік раннього згоряння та підвищувати швидкість фронту полум'я [5, 11]. Разом із позитивним впливом на індикаторний ККД і зниженням викидів CO та сажі це супроводжується зростанням пікових температур і тисків у циліндрі, що може призводити до локальних перегрівів елементів камери згоряння, випускного тракту та прилеглих конструкцій суднової енергоустановки [11, 13].

Для суднових дизельних двигунів зазначені ефекти мають особливе значення з огляду на тривалі режими роботи під навантаженням і обмежені можливості тепловідведення у машинному відділенні. Чисельні дослідження підтверджують, що зі збільшенням частки водню зростає неоднорідність температурних полів, а у разі порушення оптимального фазування упорскування дизельного палива можливе утворення незгорілого водню, який надходить у випускний тракт [11, 12]. Такий водень може виступати додатковим чинником пожежної небезпеки, особливо у поєднанні з високими температурами випускних газів і поверхонь теплообмінного обладнання [3, 4].

Паралельно розвиваються дослідження пожежної та вибухопожежної безпеки водневих систем,

у яких основну увагу приділено витокам, дифузії та формуванню займистих газоповітряних сумішей у замкнених або обмежено вентильованих просторах [7, 9]. Показано, що швидка дифузія водню не гарантує його безпечного розсіювання у складних геометріях, характерних для машинних відділень суден, де можливе формування локальних зон накопичення під перекриттями та між конструктивними елементами [8, 10]. Визначальну роль у зниженні ризику в таких умовах відіграють параметри вентиляції, своєчасність газодетекції та ефективність автоматичного відключення подачі водню, що підкреслюється як у нормативних документах, так і в аналітичних оглядах [3, 4].

Разом з тим, аналіз літератури свідчить про відсутність узгодженого методичного підходу, який би поєднував результати досліджень робочого процесу дизельного двигуна у режимі з додаванням водню з оцінюванням пожежної небезпеки суднової енергоустановки в цілому [10, 11]. Існуючі нормативні вимоги та рекомендації орієнтовані або на традиційні дизельні установки, або на водневі системи з паливними елементами, що зумовлює необхідність розроблення спеціалізованої ризик-орієнтованої методики для двопаливних суднових енергоустановок [1, 2].

Об'єкт дослідження та постановка наукової задачі. Об'єктом дослідження є суднова енергетична установка з традиційним середньооборотним дизельним двигуном, модернізована для роботи у двопаливному режимі «дизельне паливо – водень», у складі машинного відділення морського транспортного судна. Як базову прийнято компоновку типової СЕУ з головним дизельним двигуном, дизель-генераторами, системами паливоподачі, вентиляції та пожежогашіння, у яку інтегровано підсистему виробництва, транспортування й дозованого введення водню у паливну систему двигуна [1, 2]. На рис. 1 наведено узагальнену структурну схему СЕУ з інтегрованою водневою підсистемою, що визначає межі аналізу небезпек та місця формування ініціюючих відмов [4].

У подальшому для ризик-орієнтованого аналізу приймається режим малої добавки водню до дизельного палива, характерний для мікродозування, з граничним рівнем близько 0,1 % за масою. Особливістю розглядуваної схеми є введення малих домішок водню безпосередньо в паливопровід високого тиску перед форсункою, що дозволяє уникнути подачі газу у випускний тракт і зменшити об'єм потенційного утворення воднево-повітряних сумішей [5, 6]. Такий підхід підтверджено експериментальними дослідженнями,

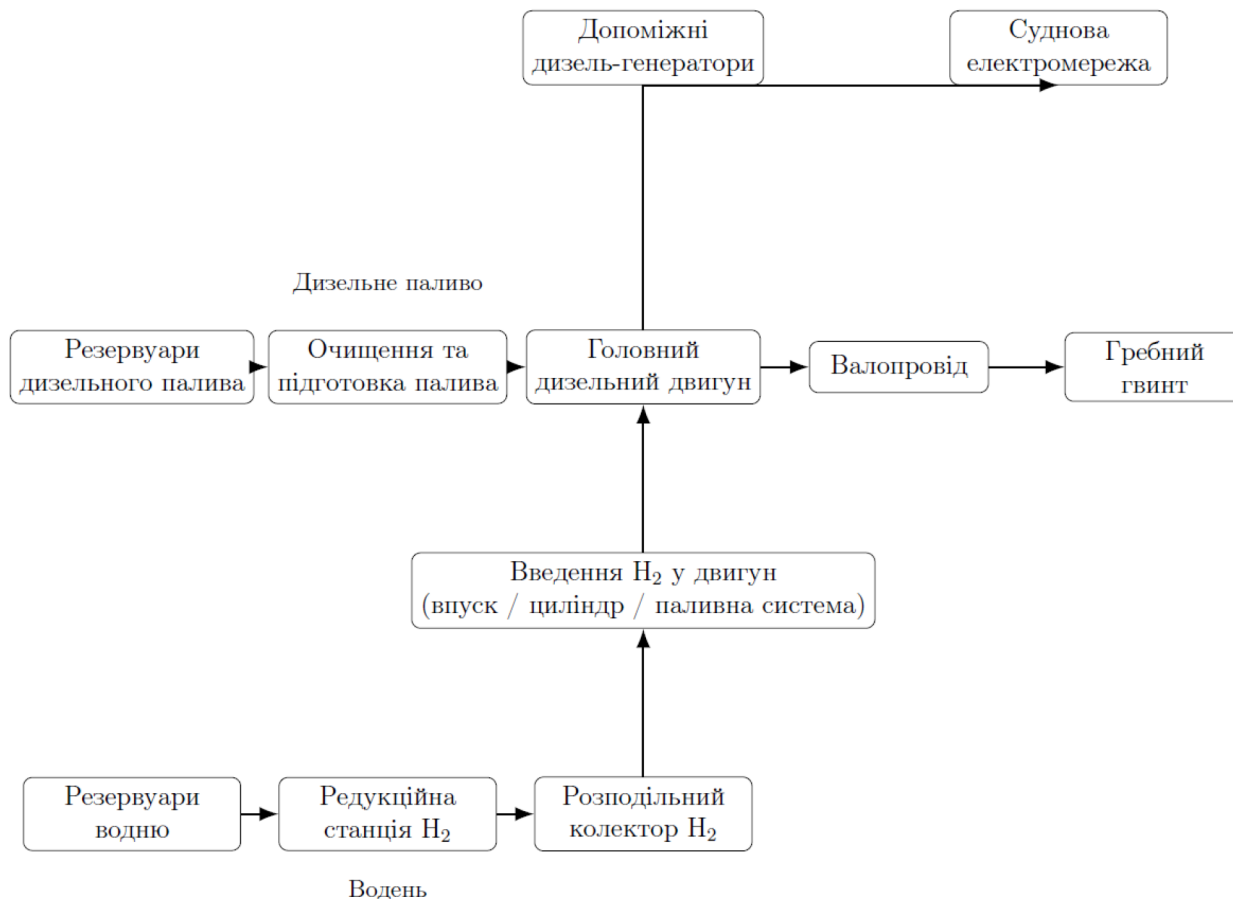


Рис. 1. Узагальнена структурна схема суднової енергоустановки з інтегрованою підсистемою подачі водню

у яких показано зміну параметрів упорскування та розпилювання без формування значних об'ємів горючих сумішей у впускній системі [6].

Водночас на рівні машинного відділення з'являються нові елементи підвищеної небезпеки: агрегат виробництва водню, буферні ємності, трубопроводи та арматура середнього тиску, а також локальні вузли дозування. Саме ці елементи формують додаткові джерела пожежної та вибухопожежної небезпеки, відмінні за характером від традиційних дизельних систем, що потребує окремого аналізу з позицій водневої безпеки та вимог до компоновки і захисних бар'єрів [3, 4].

Предметом дослідження є закономірності формування пожежонебезпечних станів у суднової енергоустановці при роботі з використанням водневих мікродомішок в суднових енергетичних установках (СЕУ), а також вплив конструктивно-технологічних рішень і систем безпеки на вогнестійкість огорожувальних конструкцій та інтегральний рівень пожежного ризику.

На основі аналізу літературних джерел і практичних особливостей експлуатації СЕУ сформульовано такі ключові **науково-технічні задачі дослідження**:

- ідентифікувати характерні пожежонебезпечні сценарії, пов'язані з витокami водню та його займанням у машинному відділенні;
- визначити критерії оцінювання пожежної небезпеки й вогнестійкості елементів СЕУ з урахуванням теплових і газодинамічних впливів;
- проаналізувати вплив конструктивних рішень (розміщення обладнання, трасування трубопроводів, застосування теплових екранів) на рівень пожежного ризику;
- обґрунтувати роль вентиляції, газодетекції та алгоритмів керування як ключових елементів системи цивільного захисту при використанні водню на судах.

Розв'язання цих задач створює основу для переходу від фрагментарної оцінки окремих небезпечних факторів до системного аналізу пожежної безпеки суднових енергоустановок на режимі з використанням водню в СЕУ.

Викладення основного матеріалу дослідження. Формування пожежонебезпечних сценаріїв роботи суднової енергоустановки. Оцінювання пожежної безпеки суднової енергоустановки при використанні водню як добавки до дизельного палива доцільно виконувати на основі сценарного підходу, який широко застосовується

в аналізі ризиків водневих систем і суднових енергетичних установок [7, 9]. Такий підхід дозволяє врахувати не лише сам факт наявності горючого газу, а й комбінацію умов, за яких потенційна небезпека реалізується у вигляді надзвичайної ситуації, що відповідає сучасним вимогам ризик-орієнтованого проєктування [8, 10].

У межах дослідження сценаріїв розглядається як формалізований ланцюг подій, що включає ініціюючу відмову, умови розвитку процесу та кінцеві наслідки для конструкцій і систем судна. Просторове розташування джерел витоку водню та потенційних джерел запалювання істотно визначає тип сценарію та рівень його наслідків, що є характерною особливістю машинних відділень суден зі складною геометрією і багаторівневою компоновкою обладнання [9, 10]. Схема зонування машинного відділення з виділенням потенційно небезпечних зон наведена на рис. 2.

Формування сценаріїв ґрунтується на узгодженні трьох визначальних факторів: масштабу витоку водню, просторового розташування джерела витоку в машинному відділенні та функціонального стану систем безпеки (вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань), що відповідає підходам, рекомендованим у нормативних і методичних документах з водневої безпеки [3, 4]. З урахуванням конструктивних особливостей підсистеми подачі H_2 доцільно виділяти декілька характерних зон можливого витоку: агрегат виробництва та буферного зберігання водню, газову арматуру середнього тиску, трубопроводи у верхніх частинах машинного відділення, а також локальні вузли дозування на лініях високого тиску

перед форсунками, які формують основні ініціюючі події для сценарного аналізу [7, 8]. За масштабом аварії розрізняють мікровитоки, що характеризуються малою витратою та тривалим часом розвитку, і масовані витоки, пов'язані з раптовим руйнуванням трубопроводів або арматури.

Додатковим виміром є стан вентиляції та газодетекції: від штатної роботи систем до їх часткової або повної відмови. Комбінація зазначених факторів дозволяє сформуванню обмеженої, але репрезентативної множини базових сценаріїв, які охоплюють основні небезпечні ситуації для двопаливної СЕУ.

У роботі виділено чотири узагальнені сценарії S1–S4. Сценарій S1 відповідає мікровитоку водню за умов ефективної вентиляції без займання, коли основним ризиком є накопичення горючої суміші до концентрацій, близьких до нижньої межі займистості. Сценарій S2 описує мікровитік з відкладеним займанням, при якому локально сформована хмара H_2 запалюється від випадкового джерела. Сценарій S3 характеризується масованим витоком з негайним займанням і формуванням факельної пожежі, що створює інтенсивний тепловий вплив на конструкції. Найбільш несприятливим є сценарій S4, коли масований витік поєднується з неефективною вентиляцією, що призводить до накопичення об'ємної вибухонебезпечної хмари та можливого вибухового горіння. Структурно-логічний зв'язок між сценаріями S1–S4 та набором критеріїв для їх кількісної оцінки наведено на рис. 3.

Запропонована система сценаріїв слугує базою для подальшого кількісного аналізу пожежної

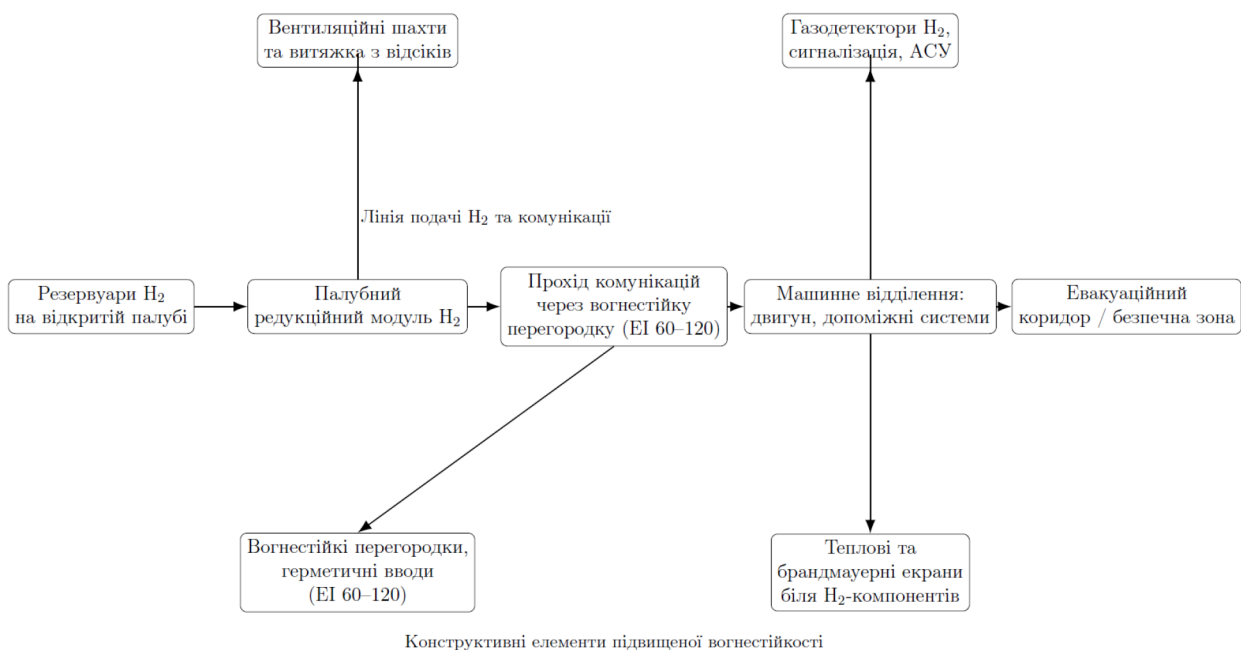


Рис. 2. Схематичний план машинного відділення з позначенням основних агрегатів, гарячих поверхонь та потенційних зон акумуляції водню

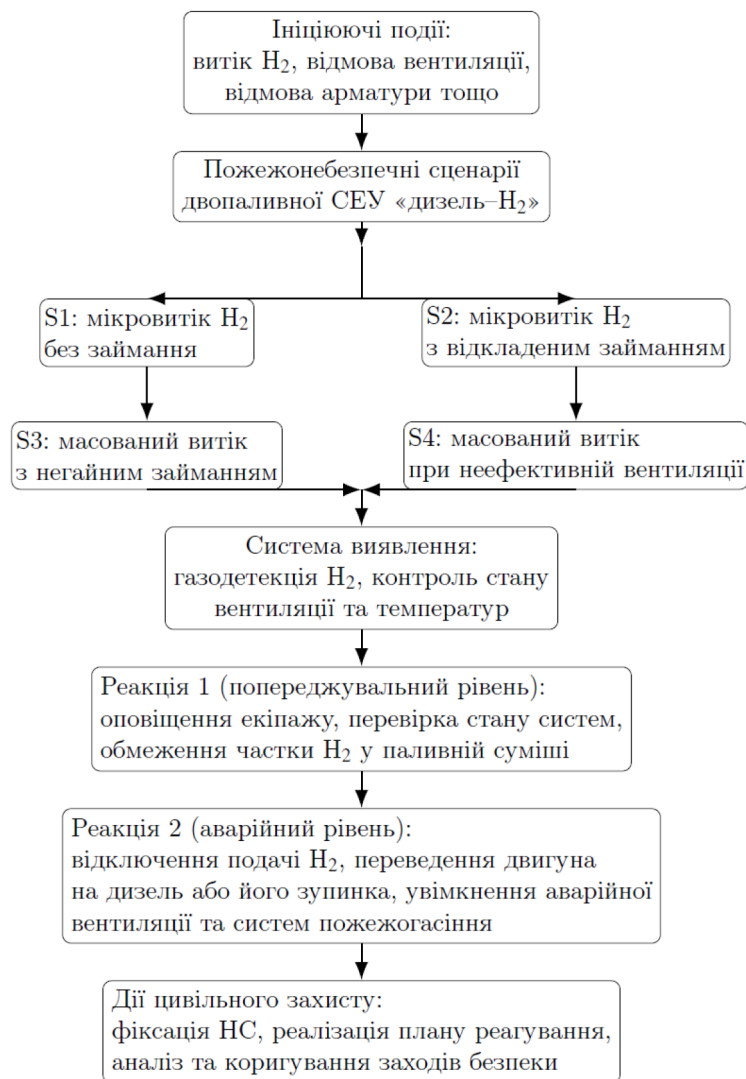


Рис. 3. Структурно-логічна схема зв'язку між базовими сценаріями S1–S4 та критеріями їх оцінювання

небезпеки та оцінювання вогнестійкості елементів суднової енергоустановки.

Критерії оцінювання пожежної небезпеки та вогнестійкості. Кількісна оцінка пожежної небезпеки суднової енергоустановки в двопаливному режимі «дизель – водень» потребує введення системи критеріїв, здатних відобразити як імовірність реалізації небезпечної події, так і тяжкість її наслідків для конструкцій, обладнання та безпеки екіпажу. У межах сценарного підходу такі критерії повинні бути уніфікованими для сценаріїв S1–S4 та придатними для порівняльного аналізу різних конструктивно-технологічних рішень. Вихідні дискретизовані оцінки P і C для сценаріїв S1–S4 до/після впровадження заходів наведено в табл. 1; на їх основі побудовано матрицю ризику (рис. 4). У роботі величина P не є математичною ймовірністю у строгому сенсі, а являє собою дискретну експертно-аналітичну оцінку рівня імовірності реалізації сценарію за шкалою 1–5. Для забезпечення однозначності інтерпретації

матриці ризику в роботі використано п'ятирівневі дискретні шкали імовірності реалізації сценарію та тяжкості його наслідків.

Рівень $P = 1$ відповідає малоімовірному сценарію, реалізація якого можлива лише за несприятливого поєднання кількох відмов або порушень експлуатації; $P = 2$ – низькій імовірності за наявності окремих відмов або локальних відхилень режиму; $P = 3$ – помірній імовірності реалізації за типових експлуатаційних умов при частковій деградації захисних функцій; $P = 4$ – високій імовірності у разі поєднання характерних відмов елементів системи та недостатньої ефективності запобіжних заходів; $P = 5$ – дуже високій імовірності, коли сценарій практично очікуваний за відмови основних бар'єрів безпеки.

Шкала наслідків також має п'ять рівнів: $C = 1$ – незначні наслідки без втрати функціональності СЕУ та без небезпеки для екіпажу; $C = 2$ – локальні пошкодження або короточасні порушення роботи окремих підсистем; $C = 3$ – помітні функціональні

порушення, що потребують втручання персоналу та відновлювальних дій; $C = 4$ – тяжкі наслідки з істотним пошкодженням обладнання, втратою працездатності частини систем і високою загрозою для персоналу; $C = 5$ – критичні наслідки, пов’язані з великомасштабним пошкодженням, можливою втратою функціональності енергоустановки та неприйнятним рівнем небезпеки для екіпажу.

Значення, наведені в табл. 1, отримано не як прямі статистичні частоти аварій, а як результат комбінованого сценарно-експертного оцінювання. Для кожного сценарію враховувалися: 1) тип і масштаб ініціувальної відмови; 2) просторове положення джерела витoku; 3) стан вентиляції; 4) наявність

та швидкодія газодетекції; 5) імовірність наявності джерела запалювання; 6) очікуваний масштаб теплового та функціонального ураження. На цій основі сценарію присвоювалися дискретні оцінки рівня імовірності та тяжкості наслідків за уніфікованими п’ятирівневими шкалами.

Першим базовим критерієм є умовна ймовірність займання суміші « H_2 –повітря» P_{ign} . Вона визначається досягненням концентрацій водню меж займистості у відповідних зонах машинного відділення, наявністю джерел запалювання та тривалістю їх одночасної дії. Для сценаріїв з мікровитоками (S1, S2) ключовим чинником є ефективність вентиляції та швидкість накопичення H_2 , тоді як для сценаріїв S3 і S4 вирішальну

Таблиця 1

Параметри сценаріїв для матриці ризику

Сценарій	Опис	Ймовірність до заходів P_b	Наслідки до заходів C_b	Ймовірність після заходів P_i	Наслідки після заходів C_i
S1	Мікровиток H_2 без займання	3	1	2	1
S2	Мікровиток з відкладеним займанням	2	3	1	2
S3	Масовий виток з негайним займанням	2	5	1	4
S4	Масовий виток при неефективній вентиляції	1	5	1	4

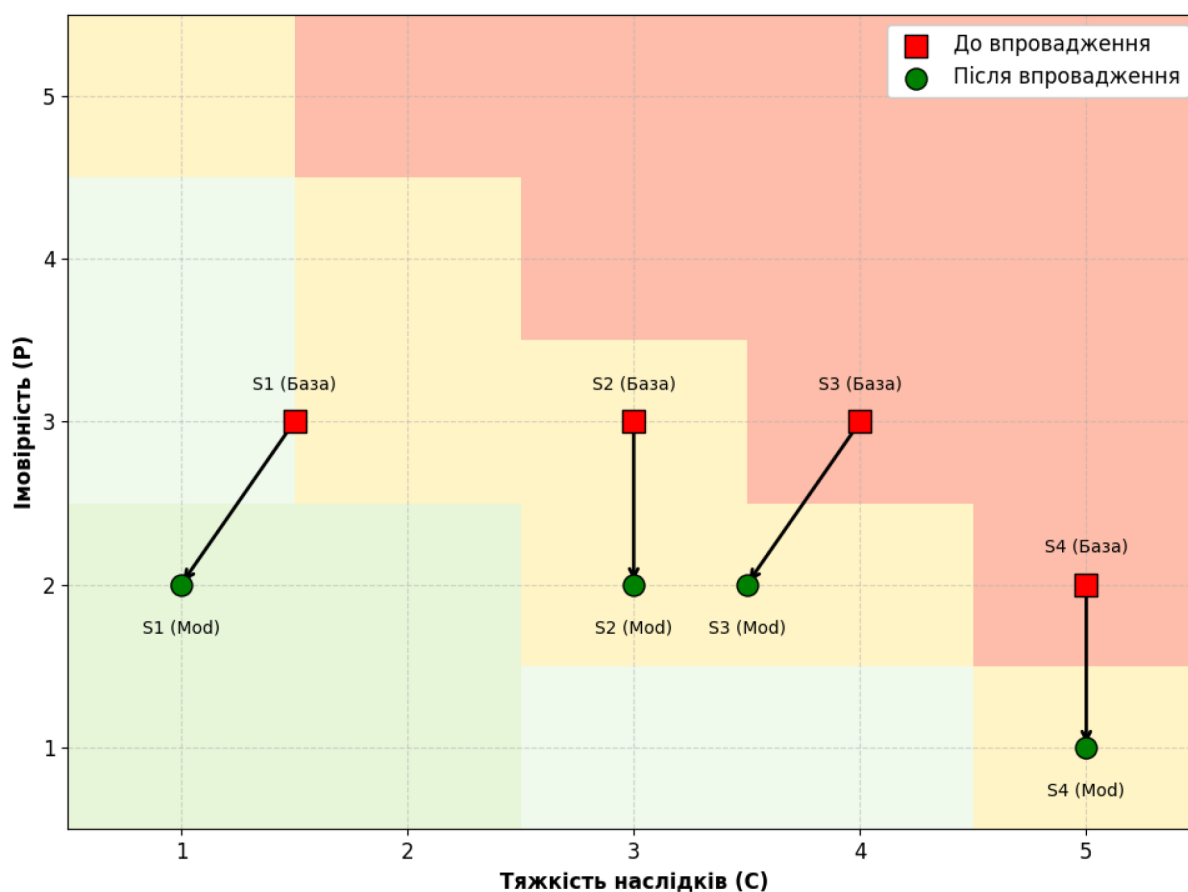


Рис. 4. Матриця ризику «ймовірність – наслідки» для базового та вдосконаленого варіантів системи захисту при сценаріях S1–S4

роль відіграє миттєва наявність відкритих гарячих поверхонь і електричних джерел іскроутворення, що узгоджується з підходами кількісної оцінки ризику водневих систем на судах [7, 9].

Другим критерієм виступає інтенсивність теплового потоку q'' , що діє на поверхні огорожувальних конструкцій, трубопроводів та елементів двигуна. Для факельних пожеж і об'ємного горіння водню тепловий вплив оцінюється як функція витрати газу, геометрії факела та відстані до поверхні, після чого порівнюється з критичними рівнями, за яких відбувається втрата несучої здатності сталевих конструкцій, деградація теплоізоляції або виникає ризик вторинного займання дизельного палива й мастила [3, 4].

Важливим часовим показником є час досягнення граничної температури τ_T у контрольному перерізі конструкції, який характеризує запас її вогнестійкості та зіставляється з тривалістю пожежного впливу для відповідного сценарію. Якщо τ_T перевищує час, необхідний для аварійного відключення подачі водню та реагування екіпажу, конструкція вважається такою, що забезпечує прийнятний рівень безпеки. Окремо розглядається час збереження функціональності критичних систем t_{func} (вентиляції, електроживлення, систем керування та сигналізації), оскільки їх працездатність є ключовою умовою ефективної локалізації аварії [1, 2].

Зазначені критерії формують кількісну основу для подальшого узагальнення результатів сценарного аналізу та побудови матриць ризику й інтегрального показника пожежної небезпеки. Їх використання дозволяє перейти від оцінювання окремих небезпечних факторів до системного порівняння різних конфігурацій судових енергоустановок у двопаливному режимі з позицій пожежної безпеки [7, 8].

Узагальнена методика ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки. З урахуванням сформованих пожежонебезпечних сценаріїв S1–S4 та визначеної системи кількісних критеріїв у роботі розроблено узагальнену методику ризик-орієнтованої оцінки пожежної безпеки судових енергоустановок у двопаливному режимі «дизель – водень». Методика спрямована на перехід від якісних експертних суджень до кількісно обґрунтованого порівняння різних конфігурацій СЕУ та технічних рішень з інтеграції водню.

Ключовим елементом методики є поєднання імовірнісної оцінки реалізації сценаріїв із детермінованою оцінкою їх наслідків. Для кожного сценарію S_i визначається умовна ймовірність P_i , яка враховує частоту можливих відмов елементів водневої підсистеми, ефективність вентиляції,

чутливість і швидкодію систем газодетекції, а також наявність потенційних джерел запалювання. Наслідки C_i нормуються за шкалою, що відображає ступінь ураження огорожувальних конструкцій, втрату функціональності критичних систем і рівень загрози для екіпажу.

На цьому етапі дослідження оцінювання імовірності реалізації сценаріїв S1–S4 здійснюється за комбінованим сценарно-експертним підходом, оскільки репрезентативні статистичні масиви саме для судових дизельних енергоустановок із мікродомішкою водню є обмеженими. Формування оцінок виконується послідовно у чотири етапи.

На першому етапі для кожного сценарію ідентифікуються ініціювальні події: порушення герметичності з'єднань, локальна відмова арматури або трубопроводу, недостатня ефективність вентиляції, затримка спрацювання газодетекції, наявність джерела запалювання.

На другому етапі оцінюється вплив захисних бар'єрів, до яких віднесено вентиляцію, газоаналіз, відсічну арматуру, теплове екранування та алгоритми аварійного відключення.

На третьому етапі для сценарію виконується експертне ранжування за п'ятирівневою шкалою імовірності залежно від поєднання ініціювальних подій та стану захисних бар'єрів.

На четвертому етапі отримана дискретна оцінка P використовується в матриці ризику та в інтегральному показнику пожежної небезпеки.

Таким чином, значення P у Таблиці 1 слід трактувати як результат формалізованого експертного оцінювання, узгодженого з фізикою процесу витоку, накопичення і займання водню, а не як прямі частотні статистичні оцінки аварій. (Майбутні дослідження передбачають калібрування шкали на основі даних експлуатації).

На першому етапі методики виконується сценарна ідентифікація небезпек для конкретної компоновки машинного відділення та схеми подачі водню. Далі для кожного сценарію здійснюється оцінка теплового впливу, часу досягнення граничних температур і часу збереження функціональності систем безпеки. Отримані дані використовуються для заповнення матриці ризику в координатах «ймовірність – наслідки», що дозволяє виявити сценарії з неприйнятним або умовно прийнятним рівнем ризику.

Для інтегральної оцінки пожежної небезпеки вводиться узагальнений показник I_{five} , який визначається як зважена сума добутоків імовірностей та наслідків для всіх сценаріїв. Вагові коефіцієнти обираються з урахуванням пріоритетів цивільного захисту та специфіки експлуатації судна. Такий підхід дає змогу порівнювати базову дизельну

СЕУ, двопаливну установку без спеціальних заходів та варіанти з оптимізованими конструктивно-технологічними рішеннями.

Запропонована методика є універсальною з точки зору застосування: вона може бути адаптована як на етапі проектування нових суден, так і при оцінюванні пожежної безпеки модернізованих існуючих СЕУ. Її використання дозволяє обґрунтовано приймати рішення щодо доцільності впровадження водневих технологій з позицій пожежної безпеки та цивільного захисту.

Конструктивно-технологічні бар'єри та кількісна ризик-орієнтована оцінка пожежної безпеки СЕУ в режимі «дизель–Н₂». Пожежна безпека двопаливної суднової енергоустановки визначається сукупністю пасивних (конструктивних) і активних (технологічних) бар'єрів, а також їх відображенням у кількісній оцінці ризику для сценаріїв S1–S4. На відміну від традиційної дизельної СЕУ, інтеграція водню додає джерело горючого газу з високою дифузійною здатністю та широкими межами займистості, що вимагає перегляду компоновки машинного відділення й логіки захисту. До ключових конструктивних рішень належать:

1) розміщення агрегатів виробництва/буферного зберігання Н₂ поза машинним відділенням або в ізольованих відсіках для мінімізації накопичення газу у верхніх зонах та контакту з гарячими поверхнями;

2) раціональне трасування трубопроводів переважно у «холодних» зонах із мінімізацією фланцевих з'єднань та локальним екрануванням у місцях перетину з високотемпературними ділянками;

3) застосування вогнестійких перегородок і теплових екранів, що збільшують час досягнення граничних температур і зменшують ризик вторинного займання рідких горючих (палива/мастила).

Оптимальна компоновка досягається поєднанням просторового розділення, скороченням «слабких місць» (арматура/стикування) та цільовим тепловим захистом.

Активний контур безпеки формується технологічними рішеннями та алгоритмами керування. В умовах використання Н₂ традиційна вентиляція, орієнтована на тепловідвід, часто є недостатньою; пріоритетом стає видалення водню з верхніх зон і локальних «кишень» через комбіновану загальнообмінну та локальну витяжну вентиляцію, що знижує імовірність сценаріїв накопичення і відкладеного займання (S2, S4). Газодетекція повинна бути зосереджена в зонах потенційного витоку та верхній частині відсіку; застосування

двопорогової логіки (попередження/аварія) забезпечує градуйовану реакцію – від корекції подачі до повного відсічення Н₂. Вентиляція, детекція та виконавчі органи інтегруються алгоритмами аварійних блокувань: автоматичне зниження/відсічення подачі, зупинка електролізера, переведення двигуна на чистий дизель, активація аварійної вентиляції – усе це скорочує тривалість дії небезпечних факторів і підвищує ймовірність збереження працездатності критичних систем.

Для формалізованого порівняння рівнів безпеки застосовується кількісна ризик-орієнтована процедура за сценаріями S1–S4 з оцінюванням ймовірності реалізації P_i та наслідків C_i . Ймовірність враховує частоту відмов елементів водневої підсистеми, ефективність вентиляції та швидкість газодетекції; наслідки – ступінь теплового ураження огорожувальних конструкцій, втрату функціональності критичних систем і загрозу екіпажу. Оцінювання виконується за дискретними шкалами (1–5) для базового та вдосконаленого станів системи захисту, а ризик для сценарію визначається як

$$R_i = P_i \cdot C_i.$$

Зведення результатів у матрицю «ймовірність–наслідки» дає змогу виявити сценарії, що формують неприйнятні рівні ризику (як правило, S2–S4 без спеціальних заходів), та кількісно показати ефект впроваджених бар'єрів через зниження P_i і C_i і відповідне зміщення до зон керованого/прийнятного ризику.

Інтегральний показник пожежної небезпеки та порівняння конфігурацій СЕУ. Для узагальнення результатів сценарного та ризик-орієнтованого аналізу доцільно перейти від окремих оцінок R_i до інтегрального показника пожежної небезпеки суднової енергоустановки. Такий показник дозволяє зіставляти різні конфігурації СЕУ, враховуючи сукупний вплив усіх релевантних сценаріїв пожежі та вибухопожежної небезпеки при використанні водню.

$$S_i = \alpha_1 S_{th,i} + \alpha_2 S_{fn,i} + \alpha_3 S_{cr,i}$$

де:

- $S_{th,i}$ – бальна оцінка термічного ураження конструкцій;
- $S_{fn,i}$ – бальна оцінка втрати функціональності критичних систем;
- $S_{cr,i}$ – бальна оцінка загрози для екіпажу;

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Інтегральний показник пожежної небезпеки пропонується визначати у вигляді зваженої суми ризиків для окремих сценаріїв:

$$I_{\text{fire}} = \sum_{i=1}^4 w_i P_i C_i,$$

А для інтегрального показника:

$$I_F = \sum_{i=1}^4 W_{E,i} P_i S_i,$$

де P_i – імовірність реалізації сценарію S_i , C_i – нормована оцінка тяжкості наслідків, w_i – ваговий коефіцієнт, що відображає відносну значущість сценарію з точки зору цивільного захисту та безпеки експлуатації судна. Вагові коефіцієнти обираються з урахуванням потенційного ураження екіпажу, масштабів можливих конструктивних пошкоджень та імовірності втрати функціональності СЕУ. Результати інтегральної оцінки пожежної небезпеки для трьох конфігурацій наведено в табл. 2; їх графічне порівняння подано на рис. 5. При призначенні вагових коефіцієнтів w_i використано принцип відносної значущості сценарію за трьома критеріями:

1. потенційний рівень небезпеки для екіпажу;
2. очікуваний масштаб термічних і конструктивних пошкоджень;
3. імовірність втрати працездатності критичних підсистем СЕУ.

Сценарії, що поєднують значну загрозу для персоналу з можливістю розвитку тяжких пошкоджень і функціональної дестабілізації установки, отримують вищі значення w_i . Відповідно, для сценаріїв локального мікротоку без займання вагові коефіцієнти приймаються меншими, ніж для сценаріїв масованого витоку з займанням або неефективною вентиляцією.

Перевірка чутливості показала, що при варіюванні вагових коефіцієнтів у межах $\pm 15\%$ від базових значень абсолютні величини інтегрального показника змінюються, однак якісне

співвідношення між базовою дизельною СЕУ, двопаливною СЕУ без додаткових заходів і двопаливною СЕУ з оптимізованими заходами залишається незмінним. Це свідчить про стійкість висновку щодо підвищеного ризику для неадаптованої двопаливної конфігурації та ефективності запропонованих захисних рішень.

Таблиця 2

Інтегральний показник пожежної небезпеки для різних конфігурацій СЕУ

Конфігурація	Інтегральний показник пожежної небезпеки I_{fire}
Базова дизельна СЕУ	12
Двопаливна СЕУ без додаткових заходів	28,5
Двопаливна СЕУ з оптимізованими заходами	14,2

Запропонований показник використано для порівняння трьох характерних конфігурацій суднової енергоустановки. Перша конфігурація відповідає традиційній дизельній СЕУ без використання водню, де пожежний ризик формується переважно витокami рідкого палива, мастила та нагрівом вихлопних систем. Друга конфігурація – двопаливна СЕУ без спеціальних конструктивно-технологічних заходів – характеризується появою додаткових сценаріїв, пов'язаних із витокami та займанням H_2 , що призводить до зростання інтегрального показника пожежної небезпеки. Третя конфігурація включає оптимізовані рішення щодо розміщення водневого обладнання, трасування трубопроводів, теплового екранування, вентиляції, газодетекції та алгоритмів керування. Порівняльний аналіз показує, що для двопаливної СЕУ



Рис. 5. Порівняння інтегрального показника пожежної небезпеки для трьох конфігурацій: базова дизельна СЕУ, двопаливна СЕУ без додаткових заходів, двопаливна СЕУ з оптимізованими конструктивно-технологічними рішеннями

без додаткових заходів значення I_{fire} суттєво перевищує відповідний показник для базової дизельної установки. Водночас впровадження комплексу конструктивних і технологічних рішень дозволяє знизити інтегральний показник до рівня, близького до традиційної СЕУ, або до значень, які можуть бути класифіковані як прийнятні з позицій сучасних підходів до цивільного захисту.

Таким чином, інтегральний показник пожежної небезпеки є ефективним інструментом для кількісного обґрунтування доцільності використання водню в суднових енергоустановках і вибору раціональних технічних рішень з урахуванням вимог пожежної безпеки.

Запропонована методика має визначені межі застосування. У поточній редакції вона орієнтована на суднові дизельні енергоустановки, в яких водень використовується як мала домішка до дизельного палива, орієнтовно до 0,1 % за масою, з подачею у паливопровід високого тиску перед форсункою. Методика призначена для етапів концептуального проектування, порівняльного аналізу варіантів компоновки та оцінювання ефективності захисних заходів у машинному відділенні. Її безпосереднє застосування до установок з високими частками заміщення дизельного палива воднем, до систем зі значними запасами стисненого або криогенного водню, а також до інших архітектур подачі H_2 потребує додаткового уточнення сценаріїв, шкал імовірності та критеріїв наслідків. Отже, одержані результати не слід некритично поширювати на всі типи суден і всі варіанти водневих енергетичних систем.

Обговорення результатів та зіставлення з існуючими дослідженнями. Отримані результати дозволяють розширити наявні уявлення про пожежну безпеку водневих енергетичних систем у морській галузі та уточнити специфіку двопаливного режиму «дизель – водень» у складі традиційної суднової енергоустановки. На відміну від більшості публікацій, зосереджених на показниках ефективності та екологічності згорання, у даній роботі акцент зроблено на інтеграції теплових, газодинамічних і конструктивних факторів у єдину ризик-орієнтовану рамку пожежної безпеки. Порівняння з CFD-дослідженнями витоків водню в машинних відділеннях суден показує, що виявлені критичні зони накопичення H_2 узгоджуються з результатами чисельного моделювання, наведеними в літературі. Водночас у більшості наявних робіт вихідною умовою є використання водню як основного палива або у складі паливних елементів, тоді як у двопаливному дизель- H_2 режимі характер небезпеки суттєво відрізняється. Малі домішки водню не формують великих

об'ємів горючої суміші у впускних трактах, але створюють локалізовані ризики в зоні генерації, транспортування та дозування газу. Отримані сценарії S1–S4 та побудована матриця ризику доповнюють існуючі ризик-орієнтовані підходи, засновані на bow-tie моделях і Байєсівських мережах, за рахунок явного врахування вогнестійкості конструкцій і часу досягнення граничних температур. Це дозволяє перейти від абстрактної оцінки «частота – наслідки» до інженерно обґрунтованого аналізу здатності суднової енергоустановки зберігати цілісність і функціональність під час пожежі.

Важливою відмінністю запропонованого підходу є інтеграція активних і пасивних заходів захисту. Результати показують, що оптимізація лише алгоритмів керування та вентиляції без належного конструктивного захисту не забезпечує достатнього зниження ризику для сценаріїв з інтенсивним тепловим впливом. Водночас поєднання теплових екранів, раціонального трасування трубопроводів і швидкодійної газодетекції дає синергійний ефект, який не фіксується у більшості попередніх досліджень.

Таким чином, робота демонструє, що пожежна безпека двопаливних суднових енергоустановок потребує окремого методичного підходу, відмінного як від традиційних дизельних систем, так і від повністю водневих енергетичних установок, що є її основним науковим внеском.

Висновки та практичне значення дослідження. Встановлено, що пожежна небезпека суднових енергоустановок у двопаливному режимі «дизель – водень» визначається насамперед просторовою організацією водневої підсистеми, характером можливих витоків та ефективністю пасивних і активних засобів захисту, а не безпосередньо часткою водню в паливі. Найбільш критичними є сценарії масованих витоків H_2 за умов неефективної вентиляції машинного відділення.

Запропоновано сценарний підхід до аналізу пожежної небезпеки, що охоплює аварійні ситуації S1–S4 і дозволяє формалізувати як імовірність займання, так і тяжкість теплового впливу з урахуванням запасу вогнестійкості елементів суднової енергоустановки. Обґрунтовано систему кількісних критеріїв оцінювання, яка включає імовірність займання, інтенсивність теплового потоку, час досягнення граничних температур та час збереження функціональності критичних систем.

Розроблено ризик-орієнтовану методику оцінки пожежної безпеки на основі матриці «ймовірність – наслідки» та інтегрального показника пожежної небезпеки I_{fire} . Показано, що впровадження водню без спеціальних

конструктивно-технологічних заходів призводить до зростання інтегрального ризику, тоді як комплексна оптимізація дозволяє знизити його до рівня, порівнянного з традиційною дизельною СЕУ.

Встановлено, що найбільший внесок у підвищення пожежної безпеки забезпечують просторове розділення водневого обладнання і зон інтенсивного тепловиділення, раціональне трасування трубопроводів у «холодних» зонах та застосування вогнестійких перегородок і локальних теплових екранів, впровадження комплексу заходів (екранування + активна вентиляція) дозволило знизити інтегральний показник пожежного ризику I_{fire} на 50.1 % (з 28.5 до 14.2 балів). Практичне значення результатів полягає в можливості використання запропонованої методики під час проектування й модернізації СЕУ та при обґрунтуванні прийняттого рівня пожежного ризику органами цивільного захисту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. International Maritime Organization. *Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk*: Resolution MSC.420(97). London : IMO, 2016.
2. International Maritime Organization. *International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*. London : IMO, 2017.
3. ISO/TR 15916:2015. *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
4. DNV GL. *Handbook for hydrogen-fuelled vessels*. Høvik : DNV GL, 2021. 132 p.
5. Shalapko D., Radchenko M., Pavlenko A., Radchenko R., Radchenko A., Pyrysunko M. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2024. Vol. 72, no. 2. Art. no. e148837. DOI: 10.24425/bpasts.2024.148837
6. Shalapko D. O. Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying = Дослідження впливу використання малих добавок водню до основного палива на розпилювання дизельною форсункою. *Збірник наукових праць НУК*. 2021. № 4 (487). С. 14–19. DOI: 10.15589/znp2021.4(487).3
7. Aarskog F. G., Rødseth H., Scheidl S. [та ін.] Concept risk assessment of a hydrogen-driven high-speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, iss. 2. P. 1359–1373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.224
8. Mao X., Zhang D., Li H. [та ін.] Risk assessment of hydrogen fuel cell ships based on fuzzy Bayesian network. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. Art. 113636. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113636.
9. Choi J.-H., Lee D., Park B.-J. Quantitative risk assessment of hydrogen leakage in a fuel cell ship.

Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, iss. 4. Art. 844. DOI: 10.3390/jmse11040844

10. Van Hoecke L., Laffineur L., Campe R. [та ін.] Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14. P. 815–843. DOI: 10.1039/D0EE03078A

11. Dimitriou P., Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, iss. 38. P. 24470–24486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.232

12. Yip H. L., Srna A., Yuen A. C. Y. [та ін.] A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, iss. 22. Art. 4842. DOI: 10.3390/app9224842

13. Zhu L., Zhang W., Liu W. [та ін.] Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched marine diesel engine. *Fuel*. 2022. Vol. 315. Art. 123236. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123236

REFERENCES

1. International Maritime Organization. (2016). *Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk* (Resolution MSC.420(97)). IMO.
2. International Maritime Organization. (2017). *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code)*. IMO.
3. International Organization for Standardization. (2015). *ISO/TR 15916:2015 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems*. ISO.
4. DNV GL. (2021). *Handbook for hydrogen-fuelled vessels*. DNV GL.
5. Shalapko, D., Radchenko, M., Pavlenko, A., Radchenko, R., Radchenko, A., & Pyrysunko, M. (2024). Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2), Article e148837. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148837>
6. Shalapko, D. O. (2021). Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni adm. Makarova (Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding)*, (4), 14–19. [https://doi.org/10.15589/znp2021.4\(487\).3](https://doi.org/10.15589/znp2021.4(487).3) [in Ukrainian]
7. Aarskog, F. G., Rødseth, H., Scheidl, S., et al. (2020). Concept risk assessment of a hydrogen-driven high-speed passenger ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2), 1359–1373. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.224>
8. Mao, X., Zhang, D., Li, H., et al. (2023). Risk assessment of hydrogen fuel cell ships based on fuzzy Bayesian network. *Ocean Engineering*, 270, 113636. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113636>
9. Choi, J.-H., Lee, D., & Park, B.-J. (2023). Quantitative risk assessment of hydrogen leakage in a fuel cell ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 844. <https://doi.org/10.3390/jmse11040844>

10. Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., et al. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, 14, 815–843. <https://doi.org/10.1039/D0EE03078A>
11. Dimitriou, P., & Tsujimura, T. (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24470–24486. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
12. Yip, H. L., Srna, A., Yuen, A. C. Y., et al. (2019). A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: Towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*, 9(22), 4842. <https://doi.org/10.3390/app9224842>
13. Zhu, L., Zhang, W., Liu, W., et al. (2022). Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched marine diesel engine. *Fuel*, 315, 123236. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123236>

© Д. О. Шалапко, Н. В. Гречка

Науково-методична стаття

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026