

DOI: 10.31653/smf52.2026.5-19

дата першого надходження: 11.01.26

дата прийняття статті до друку після

рецензування: 21.02.26

дата публікації: 05.05.26

Голікова В.В.¹, Крайнова В.І.², Розлуцький О.М.³¹ORCID 0000-0003-1946-4609, ²ORCID 0009-0005-1843-926X,³ORCID 0000-0003-1920-927X

Національний університет «Одеська морська академія»

ІНТЕГРОВАНА ПРОАКТИВНА МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОРСЬКИХ СУДЕН В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ І ЦИФРОВІЗАЦІЇ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний етап розвитку морського транспорту характеризується істотним ускладненням умов забезпечення безпеки праці, що зумовлює необхідність перегляду традиційних підходів до її організації. Упродовж тривалого часу в галузі домінувала реактивна модель безпеки праці, за якої основна увага зосереджувалася на розслідуванні вже реалізованих подій – аварій, травм, пожеж, технічних відмов і помилок екіпажу. Такий підхід дає можливість з'ясувати причини інцидентів тільки після їх виникнення, однак в умовах ускладнення суднових систем, інтенсифікації експлуатаційних процесів і появи нових загроз його можливості для запобігання небезпечним подіям залишаються обмеженими. Підтвердженням цього є сучасні тенденції у сфері безпеки судноплавства: за даними класифікаційного товариства DNV (Det Norske Veritas), у 2022–2024 рр. кількість морських інцидентів зростає на 22 %, а кількість пожеж і вибухів – на 42 % порівняно з 2021 року [1].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває інтегрована проактивна модель безпеки праці, орієнтована не на реагування події, що вже відбулися, а на завчасне виявлення, оцінювання та попередження небезпечних станів. Її сутність полягає в системному аналізі факторів ризику ще до їх переходу в аварію або травмування, зокрема в оцінюванні функціонального стану екіпажу, технічного стану обладнання, небезпечних режимів експлуатації, цифрових збоїв, кіберзагроз і специфіки нових енергетичних систем. Такий підхід відповідає сучасним підходам до розроблення суднової системи управ-

ління безпекою, в межах якої безпечність праці доцільно розглядати не лише як результат усунення наслідків інцидентів, а також як своєчасне виявлення відхилень, що передують небезпечним подіям, та забезпечують стійке функціонування суднового середовища [2-5].

Необхідність переходу до інтегрованої проактивної моделі безпеки праці істотно посилюється під впливом енергетичного переходу в судноплаванні. Упровадження альтернативних видів суднового палива, зокрема аміаку, водню, метанолу, скрапленого природного газу та інших перспективних палив для морських суден, зумовлює формування нових профілів професійного ризику, пов'язаних із токсичністю, вибухо- та пожежонебезпечністю, а також з особливими вимогами до зберігання, вентиляції, виявлення витоків і підготовки екіпажу. Європейське агентство з безпеки на морі (European Maritime Safety Agency, EMSA) в [6] зазначає, що чинні стандарти підготовки й компетентності в Кодексі з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (Кодекс STCW) не охоплюють усіх аспектів нових паливних систем, які вже впроваджуються в морській галузі. Водночас Міжнародна морська організація (International Maritime Organization, IMO) на 109-й сесії Комітету з безпеки на морі схвалила тимчасові керівні принципи щодо безпеки суден, які використовують аміак як паливо, що вказує на активний процес формування нового нормативного середовища у сфері використання альтернативних палив [7].

Паралельно відбувається інтенсивна цифровізація судових систем, яка проявляється у широкому впровадженні автоматизованих систем управління, цифрових датчиків, програмного забезпечення, засобів дистанційного моніторингу, штучного інтелекту та електронної навігації. За таких умов безпека праці дедалі більше залежить не лише від технічного стану механізмів і професійних дій персоналу, а й від надійності цифрової інфраструктури судна. Це, своєю чергою, актуалізує проблему кіберфізичних ризиків, тобто таких ризиків, за яких цифровий збій, помилка програмного забезпечення або кібератака можуть безпосередньо трансформуватися у фізичну небезпеку – втрату керованості, зіткнення, пожежу, ушкодження обладнання, травмування екіпажу або забруднення морського середовища. Значущість цієї проблеми підтверджується тим, що, наприклад, класифікаційне товариство DNV фіксує підвищений рівень прийнятності кіберризиків в морській галузі, зокрема IMO сформувала міжнародну рамку врахування кіберризиків, Міжнародна асоціація класифікацій-

них товариств (International Association of Classification Societies, IACS) запровадила класифікаційні вимоги до кіберстійкості, а окремі національні морські адміністрації вже імплементували управління кіберризиками до обов'язкових процедур систем управління безпекою суден та безпеки судноплавства [8-10].

Не менш важливим чинником сучасної безпеки праці на морі є психофізіологічний і психосоціальний стан екіпажу. Дослідження Єльського університету (Yale University) та Фонду моряків Міжнародної федерації транспортників (ITF Seafarers' Trust) засвідчило наявність ознак депресії у 25 % опитаних моряків, тривожності – у 17 %, а суїцидальних думок – у 20 % [11]. Матеріали Міжнародної благодійної організації морського добробуту «Місія для моряків» (Mission to Seafarers) і Міжнародна мережа добробуту та допомоги морякам (International Seafarers' Welfare and Assistance Network, ISWAN) підтверджують, що добробут, відпочинок, соціальна взаємодія, відчуття фізичної безпеки та якість організації праці є безпосередньо пов'язаними з реальним рівнем безпеки на борту судна [12-14].

Отже, постановка проблеми полягає в тому, що сучасна система охорони праці на морському транспорті більше не може обмежуватися реакцією на наслідки вже реалізованих інцидентів. Вона повинна бути переорієнтована на управління ризиками, яке враховує одночасний вплив енергетичного переходу, цифрової трансформації судових систем, зростання кіберфізичних загроз, а також психофізіологічних і психосоціальних чинників безпеки праці екіпажу.

Узагальнення наведених джерел дає підстави стверджувати, що така переорієнтація створює передумови для формування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, здатної забезпечувати своєчасне виявлення небезпечних станів, зменшення професійного ризику та підвищення стійкості судової системи взаємодії людини і техніки в сучасних умовах [1, 5-14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження, аналітичні звіти та нормативні документи з проблематики забезпечення безпеки праці на морському транспорті доцільно систематизувати за кількома взаємопов'язаними напрямками.

Перший напрям охоплює праці й документи, присвячені загальним тенденціям трансформації безпеки судноплавства в умовах технологічних змін, енергетичного переходу та посилення кіберризиків. Так, DNV у звітах про сучасні тенденції у сфері безпеки і кіберпріоритети в морській галузі фіксує зростання кількості інцидентів одно-

часно з посиленням значущості цифрових загроз для безпечної експлуатації суден [1, 8]. EMSA у дослідженні TRAINALTER [6] акцентує увагу на тому, що чинні стандарти підготовки моряків не охоплюють усіх аспектів експлуатації суден з альтернативними паливними та енергетичними системами. Водночас IMO, IACS і USCG формують нормативне підґрунтя для реагування на нові виклики, пов'язані з безпекою суден, що використовують в якості палива аміак, інтеграцією кіберризик-менеджменту до системи управління безпекою та запровадженням обов'язкових вимог кібербезпеки для морської транспортної системи [7, 9, 10, 15].

Другий напрям утворюють дослідження, присвячені цифровізації охорони праці, передусім застосуванню цифрових двійників, штучного інтелекту та засобів імерсивного навчання. У роботах [16-18] цифрові двійники й методи, що ґрунтуються на використанні штучного інтелекту, розглядаються як інструменти діагностування несправностей, прогнозного технічного обслуговування, аналізу ризиків і підтримки прийняття рішень у морському середовищі. Окремий масив праць стосується технологій віртуальної та доповненої реальності (VR/AR-технології) у підготовці екіпажів з питань безпеки. В огляді [19] автори узагальнюють сучасний стан використання VR у тренуванні з пожежогасіння та евакуації, зокрема в [20] автори обґрунтовують доцільність поєднання CFD-моделювання й VR для відтворення пожежних сценаріїв у віртуальному машинному відділенні, а в [21] дослідники показують переваги віртуальної реальності із повним зануренням (імерсивна VR) для навчання динамічної оцінки ризику в морській діяльності. Практичний інтерес до цього напрямку підтверджується також промисловою апробацією технологій цифрового двійника в суднобудуванні та експлуатації суден, зокрема наданням DNV принципового схвалення (Approval in Principle) інтегрованої хмарної системи Hyundai Intelligent Digital Twin Ship (HiDTS), розробленій групою HD Hyundai [22].

Третій напрям охоплює дослідження людського фактора, психофізіологічного стану екіпажу, психосоціальних умов праці та можливостей їх цифрового моніторингу. Дослідження, описане в [11] засвідчує високу поширеність симптомів депресії, тривожності та суїцидальних думок серед моряків. Матеріали Mission to Seafarers демонструють, що рівень задоволеності моряків змінюється під впливом умов праці, доступу до сходу на берег, відчуття безпеки, навчання та організації побуту на борту судна [12, 13]. ISWAN у межах проєкту

«Соціальна взаємодія має значення» (Social Interaction Matters (SIM) Project) доводить, що соціальна взаємодія, відпочинок і щоденні організаційні практики на судні є важливими чинниками добробуту та безпечності праці [14]. Поряд із цим у праці [23] показано, що поєднання датчиків, здатних фіксувати рухи тіла, положення працівника, зміну рівноваги, прискорення, нахили та інші ознаки нестійкості, із методами машинного навчання, які дають змогу аналізувати ці дані та виявляти характерні ознаки небезпечної поведінки чи стану, створює передумови для завчасного виявлення підвищеного ризику падіння моряків під час роботи на судні.

Отже, аналіз зазначених праць дає підстави говорити про поступове зміщення акценту з переважно технічного розуміння безпеки до інтегрованого бачення забезпечення безпеки праці як результату взаємодії технічних, людських, цифрових і організаційних чинників [5, 11-14, 23].

Водночас аналіз опрацьованих джерел свідчить, що більшість публікацій зосереджується на окремих компонентах проблеми – цифрових технологіях, альтернативних паливах, кібербезпеці, психічному здоров'ї, психосоціальних умовах праці та підготовці екіпажів, – не розглядаючи їх у цілісному взаємозв'язку. Це актуалізує необхідність подальшого наукового обґрунтування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, у межах якої зазначені чинники слід розглядати як взаємопов'язані складові цілісної системи забезпечення безпеки [1-24].

Постановка завдання. З урахуванням сучасних тенденцій розвитку морського транспорту постає науково-прикладне завдання формування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці, яку розуміємо як структурно-функціональне представлення сукупності технічних, організаційних, інформаційних і поведінкових компонентів, взаємодія яких забезпечує виявлення небезпек, оцінювання професійних ризиків, вибір превентивних заходів і підтримання належного рівня безпеки праці в процесі експлуатації морських суден [1-14].

У цих умовах виникає потреба в науковому обґрунтуванні такої моделі, у межах якої безпека праці розглядатиметься як результат взаємодії екіпажу, судових технічних систем, цифрової інфраструктури, психофізіологічного стану моряків і виробничого середовища. Така модель має інтегрувати засоби імерсивної підготовки, цифрові двійники, технології штучного інтелекту, інструменти моніторингу

функціонального стану моряків, механізми психосоціальної підтримки, а також засоби управління ризиками, пов'язаними з використанням альтернативних палив і кіберризиками [5, 6-10, 11-24].

Отже, завдання дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та структуризації інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, яка відповідала б сучасним умовам експлуатації суден нового покоління та забезпечувала підвищення рівня безпеки праці шляхом комплексного поєднання технічних, людських, організаційних і цифрових механізмів попередження ризиків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методологічною основою запропонованого підходу доцільно вважати концепцію Safety-II, у межах якої безпека трактується не як проста відсутність небажаних подій, а як здатність системи підтримувати кероване та прийнятне функціонування в умовах мінливого, частково непередбачуваного середовища [5]. У контексті морської галузі це означає перехід від ізольованого аналізу інцидентів до дослідження того, яким чином екіпаж, процедури, технічні засоби та цифрова інфраструктура забезпечують стійкість судна до відхилень, перевантажень і помилок у реальних умовах експлуатації.

У межах такого підходу безпеку праці на судні доцільно трактувати як властивість складної системи взаємодії людини, техніки й організації праці, що формується під впливом кількох взаємопов'язаних блоків [6-24]: імерсивної підготовки та ситуаційної візуалізації, тобто підготовки, що відбувається через практичну взаємодію з віртуальними, доповненими або змодельованими виробничими ситуаціями, для яких зазвичай використовують VR-тренажери, AR-засоби, 3D-сценарії, інтерактивні симуляції аварійних або штатних режимів роботи; моніторингу функціонального стану людини й параметрів робочого середовища; прогностичної аналітики на основі цифрових двійників і технологій штучного інтелекту; а також інтеграції ризиків, пов'язаних із новими паливами, кіберризиків і психосоціальних чинників у систему управління безпекою. Такий підхід є виправданим, оскільки саме на стику цих чинників і формується сучасний професійний ризик на морському транспорті.

Перший функціональний блок становлять засоби імерсивного навчання, комп'ютерної графіки та моделювання аварійних сценаріїв. Їх значення полягає в тому, що вони переводять правила безпеки від формального інформування до практичної готовності діяти за проце-

дурами. У морській підготовці це особливо важливо для критичних подій, таких як: пожежі в машинному відділенні, задимлення маршрутів евакуації, аварійних дій у замкнених просторах, швартових операцій підвищеної безпеки, а також робіт у токсичному чи нестабільному середовищі [19-21]. Огляд в [19] показує, що морські VR-рішення сьогодні зосереджені передусім на тренуванні з пожежогасіння та евакуації, тоді як в [21] результати свідчать про потенціал імерсивної VR-підготовки для підвищення мотивації, результативності навчання та готовності до безпечної поведінки [19, 21]. Отже, VR/AR слід розглядати не як допоміжний візуальний засіб, а як інструмент формування стійких алгоритмів безпечної поведінки.

Другий блок утворюють системи безперервного моніторингу стану моряка та параметрів робочого середовища. У традиційній моделі охорони праці стан працівника оцінюється переважно епізодично – через медогляди, інструктажі чи нагляд. Однак у судових умовах рівень втоми, стресу, ризик втрати рівноваги або когнітивного переважання можуть змінюватися набагато швидше, ніж це фіксують стандартні процедури. Саме тому датчики індивідуального носіння, біометричні платформи, локальні системи позиціонування та цифрові інструменти зворотного зв'язку доцільно розглядати як засоби раннього виявлення потенційно небезпечних станів: перевтоми, дезорієнтації, ризику падіння, перегріву або перебування працівника в небезпечній зоні без належної взаємодії з іншими членами екіпажу [23]. У дослідженні [23] встановлено, що модель машинного навчання (ML-модель), розроблена на основі даних із датчиків, розміщуваних на тілі, забезпечила значення показника Area Under the Curve (AUC) 0,9204 при класифікації ризику падіння в умовах бортової та кільової хитавиці, що свідчить про перспективність застосування такого підходу в морській практиці.

Поряд із цим сучасна система охорони праці повинна враховувати не лише фізіологічні, а й психосоціальні показники. Дані, наведені в [11], свідчать про суттєву поширеність симптомів депресії, тривожності та суїцидальних думок серед моряків. Матеріали Mission to Seafarers показують, що в Q4 2024 індекс задоволеності моряків знизився до 6,91, а у Q2 2025 зріс до 7,54, однак попри позитивну динаміку оцінок, проблеми, пов'язані з безпекою, навчанням і комплектуванням екіпажів, зберігалися серед найпоширеніших скарг [12, 13]. Під час досліджень у межах SIM Project [14] протягом трьох місяців було зібрано фізичні, психологічні та соціальні дані від 176 моряків

на шести суднах, які додатково підтвердили, що відпочинок, соціальна взаємодія й повсякденна організація життя на борту безпосередньо впливають на добробут і безпечність праці. Це означає, що сучасний моніторинг безпеки праці має поєднувати фізичні, поведінкові та психосоціальні індикатори в єдиному профілі ризику [2].

Третій блок формують цифрові двійники та прогностична аналітика із застосуванням штучного інтелекту. У морській галузі цифровий двійник доцільно розуміти не лише як віртуальну копію технічного об'єкта, а як інтеграційну платформу, яка поєднує експлуатаційні параметри, діагностичні сигнали, сценарії відмов, результати моделювання й дані сенсорного моніторингу [16-18]. В [16] продемонстровано можливість використання цифрового двійника для діагностування несправностей на автономному судні, а практичний інтерес до такого підходу підтверджується наданням принципового схвалення у 2024 році системі HiDTS компанії HD Hyundai як одного з елементів розвитку верифікації цифрових двійників на основі даних [22]. У поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту цифровий двійник може виконувати функцію ядра системи підтримки рішень, яка пов'язує технічний стан, режим експлуатації, дії екіпажу та сценарії ризику.

Четвертий блок – інтеграція ризиків альтернативних палив, кіберризиків і психосоціальних чинників у єдиний контур управління безпекою. Енергетичний перехід у судноплаванні створює нові профілі небезпеки, пов'язані з токсичністю, займистістю, параметрами зберігання, вентиляції, виявлення витоків і реагування на аварії. Аналіз джерел [6, 7, 24, 25] дає підстави вважати, що охорона праці на суднах нового покоління потребує ширшого використання підходів кількісного оцінювання ризику (Quantitative Risk Assessment, QRA), ідентифікації небезпек (Hazard Identification, HAZID), детального методу аналізу відхилень у функціонуванні систем (Hazard and Operability Analysis, HAZOP), спеціалізованої підготовки екіпажу, а також перегляду аварійних процедур і засобів безпеки з урахуванням специфіки нових енергетичних систем.

Паралельно цифровізація судових систем породжує клас кіберфізичних ризиків, що безпосередньо впливають на безпеку екіпажу, судна та морського середовища. В [8] встановлено, що 61 % морських фахівців вважають прийнятним збільшення кіберризiku, якщо це сприяє інноваціям, а 71 % вважають свої промислові активи більш уразливими до кібератак, ніж раніше. У відповідь Резолюці-

єю MSC.428(98) вимагається, щоб схвалена система управління безпекою враховувала управління кіберризиками відповідно до функціональних вимог Міжнародного кодексу з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганням забрудненню (ISM Code) [9]. Уніфіковані вимоги Міжнародної асоціації класифікаційних товариств, викладені в [10], відносно кіберстійкості судна як цілісної системи та бортових систем і обладнання, спрямовані на забезпечення захищеності цифрової інфраструктури судна на етапах проектування, побудови, інтеграції та експлуатації та поширюються на нові судна, закріплені в контрактівній документації з 1 липня 2024 року, а фінальне правило Берегової охорони США «Cybersecurity in the Marine Transportation System», що встановлює мінімальні обов'язкові вимоги до управління кіберризиками в морській транспортній системі, зокрема щодо розроблення кіберплану, призначення відповідальної особи з кібербезпеки, проведення оцінювання вразливостей, підготовки персоналу та реагування на кіберінциденти, набуло чинності 16 липня 2025 року [15].

Таблиця 1. Структурно-функціональна модель інтегрованого проактивного забезпечення безпеки праці на морському транспорті

Компонент моделі	Інтеграційний блок	Об'єкт впливу	Механізм підвищення безпеки праці	Очікуваний результат
Імерсивна підготовка та візуалізація ризиків	VR/AR-тренажери, 3D-моделі, CFD-інтегровані сценарії	Поведінка екіпажу в аварійних і нестандартних ситуаціях	Відтворення критичних сценаріїв; формування готовності до аварійних ситуацій; підвищення здатності розпізнавати зміни в виробничій обстановці	Зниження ймовірності помилок під час виконання дій у разі пожежі, евакуації та аварійних ситуацій
Моніторинг функціонального стану моряка	Датчики індивідуального носіння, біометричні датчики, системи локалізації, цифрові опитувальні інструменти	Втома, ризик падіння, стрес, дезорієнтація, ізоляція працівника	Раннє виявлення ознак небезпечних станів людини та передання інформації керівнику робіт або системі підтримки рішень	Зниження ризику інцидентів, пов'язаних із перевтомою, втратою рівноваги та когнітивним перевантаженням
Інтелектуальний аналіз і прогностичне управління	ШІ-алгоритми, комп'ютерний зір, аналіз аномалій, ризик-аналітика	Небезпечні відхилення в технічних і поведінкових процесах	Виявлення комбінацій слабких сигналів, які передують аварії або порушенню безпечного режиму праці	Перехід від реактивного реагування до попередження небезпечних подій

Закінчення таблиці 1

Компонент моделі	Інтеграційний блок	Об'єкт впливу	Механізм підвищення безпеки праці	Очікуваний результат
Інтелектуальний аналіз і прогностичне управління	ШІ-алгоритми, комп'ютерний зір, аналіз аномалій, ризик-аналітика	Небезпечні відхилення в технічних і поведінкових процесах	Виявлення комбінацій слабких сигналів, які передують аварії або порушенню безпечного режиму праці	Перехід від реактивного реагування до попередження небезпечних подій
Цифровий двійник судна / системи	Технологія цифрового двійника, інтеграція даних сенсорного моніторингу, сценарне моделювання	Суднові механізми, енергетичні установки, робочі зони, сценарії відмов	Поєднання технічного стану, експлуатаційних параметрів і ризикових сценаріїв в єдиній моделі	Підвищення точності оцінювання ризиків, ефективності моніторингу технічного стану та обґрунтованості управлінських рішень
Управління ризиками, що пов'язані з використанням альтернативних палив	QRA, HAZID, HAZOP, керівництва з безпеки, спеціалізована підготовка	Аміак, водень, інші перспективні палива	Ідентифікація специфічних небезпек токсичності, займистості, витоків, вентиляції та евакуації	Зниження ризику аварій і професійних уражень в умовах переходу до нових видів судового палива
Кіберстійкість як елемент безпеки праці	Система управління безпекою з інтегрованим управлінням кіберризиками; уніфіковані вимоги щодо кіберстійкості; план кібербезпеки	Навігаційні, автоматизовані, енергетичні та інформаційні системи судна	Інтеграція кіберризиків в загальне управління безпекою судна; захист від збоїв, що можуть мати фізичні наслідки	Зменшення ймовірності кіберфізичних інцидентів, які загрожують екіпажу і судну
Психосоціальна стійкість екіпажу	Програми підтримки добробуту, відпочинок, соціальна взаємодія, нормативно закріплена підтримка	Психічне здоров'я, командна взаємодія, стійкість до стресу	Підтримання функціональної працездатності та зниження хронічного психоемоційного виснаження	Підвищення стабільності людського елемента як ключової ланки безпеки

Джерело: розроблено авторами на основі [1-25]

Це дає підстави розглядати кіберстійкість вже не як автономну IT-функцію, а як невід'ємний компонент загальної безпеки, зокрема безпеки праці, на сучасному судні.

Узагальнення зазначених функціональних блоків у більш деталізованому вигляді наведено в таблиці 1.

З урахуванням викладеного інтегровану проактивну систему охорони праці на сучасному судні доцільно будувати як багаторівневу структуру, у якій сенсори і засоби керування та відображення інформації забезпечують збір первинних даних, цифровий двійник інтегрує технічні, виробничі та поведінкові параметри, ШІ-алгоритми виявляють відхилення і приховані ознаки ризику, VR/AR-технології використовуються для підготовки екіпажу до критичних сценаріїв, психосоціальна підтримка забезпечує стійкість людського фактору, а система управління безпекою судна закріплює ці рішення у формі процедур, тренувань, ролей і відповідальності. Саме в такій системі охорона праці перестає бути реакцією на інцидент, що вже стався, і набуває ознак керованої адаптивності, що відповідає принципу Safety-II, відповідно до якої безпека розглядається як здатність системи підтримувати прийнятний рівень функціонування в умовах змін, відхилень і експлуатаційних навантажень. [6-25].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що традиційна реактивна модель безпеки праці на морському транспорті вже не повною мірою відповідає умовам сучасної безпечної експлуатації суден. Зростання кількості морських інцидентів, ускладнення технічних систем, поширення використання альтернативних палив, цифровізація судового середовища та посилення ролі людського фактору зумовлюють необхідність переходу до інтегрованої проактивної моделі безпеки праці, у межах якої безпека розглядається як динамічна властивість системи взаємодії екіпажу, технічних засобів і виробничого середовища [1, 5, 6, 11-14].

На основі аналізу джерел обґрунтовано, що до ключових елементів такої системи доцільно віднести імерсивну підготовку на основі VR/AR і сценарного моделювання, безперервний моніторинг функціонального стану екіпажу, цифрові двійники та аналітику на основі штучного інтелекту. Їх інтеграція уможливилує перехід від реагування на наслідки до завчасного виявлення потенційно небезпечних станів, прогнозування ризикових комбінацій відхилень і підвищення

адаптивної стійкості системи «екіпаж – технічні засоби – цифрова інфраструктура – зовнішнє середовище» [5, 16-22].

Установлено, що енергетичний перехід і цифровізація морського флоту вимагають переосмислення самої структури професійного ризику. З одного боку, нові палива формують специфічні профілі небезпеки, які ще не повною мірою вивчені й не охоплені чинними стандартами; з іншого боку, посилюється значення кіберзагроз, що дедалі тісніше пов'язуються з фізичною безпекою екіпажу та функціонуванням критичних судових систем. Саме тому інтеграцію ризиків альтернативних палив і кіберризиків у єдиний контур управління безпекою доцільно розглядати як один із пріоритетних напрямів розвитку сучасної системи безпеки праці на морі [6-10, 15, 24].

Окремо встановлено, що психофізіологічний стан і психосоціальну стійкість екіпажу доцільно розглядати як самостійний компонент сучасної системи охорони праці, оскільки рівень втоми, стресу, соціальної ізоляції та психологічного виснаження безпосередньо впливає на безпеку професійної діяльності на борту [11-14, 23].

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розробленням інтегрованих систем підтримки прийняття рішень, які поєднуюватимуть дані про технічний стан судна, функціональний стан моряків, ризики нових палив, психосоціальні показники та кіберзагрози в межах єдиної прогностичної системи забезпечення безпеки. Окремим напрямом має стати нормативне й методичне забезпечення спеціалізованої підготовки моряків до роботи на суднах, що використовують альтернативні палива [6, 7, 24].

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Maritime Safety Trends 2014–2024: Preparing for Future Risks. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-safety-report-2014-2024-download/> (date: 04.03.2026).

2. Парменова Д. Г. Систематизація факторів опасности для построения профиля риска судовых работ. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 1(10). С. 30-35.

3. Голікова В. В., Крайнова В. І., Парменова Д. Г., Синюта К. О. Особливості ергономіки робочого місця майбутніх фахівців водного транспорту. *Водний транспорт*. 2022. Вип. 2(36). С. 218-223. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.18>

4. Селіванов С. Є., Пашенко Ю. В., Парменова Д. Г. Оцінка ризику. *Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції STEI-2021*. Херсон, 2021. С. 253-262.

5. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management (1st ed.). CRC Press, 2014. URL: [10.1201/9781315607511](https://doi.org/10.1201/9781315607511).

6. TRAINALTER – Study on the identification of specific competences for seafarers on ships using alternative fuels and energy systems. *European Maritime Safety Agency (EMSA)*: website. URL: <https://www.emsa.europa.eu/we-do/assistance/visits-and-inspections/129-certification-seafarers/5377-train-alter-report.html> (date: 02.03.2026).

7. Maritime Safety Committee – 109th session (MSC 109), 2-6 December 2024. *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/msc-109th-session.aspx> (date: 02.03.2026).

8. Maritime Cyber Priority 2024/25: Managing cyber risk to enable innovation. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/cyber/insights/publications/maritime-cyber-priority-2024/> (date: 03.03.2026).

9. Resolution MSC.428(98) – Maritime Cyber Risk Management in Safety Management Systems, adopted on 16 June 2017.

10. Unified Requirements E26 (Cyber Resilience of Ships) and E27 (Cyber Resilience of On-board Systems and Equipment). *International Association of Classification Societies (IACS)*: website. URL: <https://iacs.org.uk/news/iacs-ur-e26-and-e27-press-release> (date: 09.03.2026).

11. Lefkowitz R. Y., Slade M. D. Seafarer Mental Health Study. *New Haven: Yale University; ITF Seafarers' Trust*, 2019. URL: https://www.dnmf.no/getfile.php/137791-1632662805/Bildegalleri/ST_MentalHealthReport_Final_Digital-1.pdf (date: 09.03.2026).

12. Seafarers Happiness Index Q4 2024. Mission to Seafarers. URL: https://www.seafarershappinessindex.org/wp-content/uploads/Seafarers_Happiness_Index_Q4_2024.pdf (date: 02.03.2026).

13. Strong gains in seafarer happiness levels, but serious safety concerns emerge. 11.08.2025. *Mission to Seafarers*: website.

URL: <https://www.missiontoseafarers.org/news/strong-gains-in-seafarer-happiness-levels-but-serious-safety-concerns-emerge> (date: 02.03.2026).

14. Social Interaction Matters (SIM) Project. *International Seafarers' Welfare and Assistance Network (ISWAN)*: website.

URL: <https://www.iswan.org.uk/our-work/social-interaction-matters-project/> (date: 09.03.2026).

15. Cybersecurity in the Marine Transportation System. Federal Register. 2025. 90 FR 6298. *U.S. Coast Guard*: website.

URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/17/2025-00708/cybersecurity-in-the-marine-transportation-system> (date: 02.03.2026).

16. Hasan A. I., Asfihani T., Osen O. L., Bye R. T. Leveraging digital twins for fault diagnosis in autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 292. Art. 116546. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116546>.

17. Durlík I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 18. Art. 8420. <https://doi.org/10.3390/app14188420>.

18. Madusanka N. S., Fan Y., Yang S., Xiang X. Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 5. Art. 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>.

19. Vukelić G., Ogrizović D., Bernečić D., Glujić D., Vizentin G. Application of VR Technology for Maritime Firefighting and Evacuation Training – A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 9. Art. 1732. <https://doi.org/10.3390/jmse11091732>.

20. Glujic D., Vukelic G., Bernecic D., Vizentin G., Ogrizovic D. Coupling CFD and VR for Advanced Firefighting Training in a Virtual Ship Engine Room. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. Art. 103025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103025>.

21. Makransky G., Klingenberg S. Virtual reality enhances safety training in the maritime industry: An organizational training experiment with a non-WEIRD sample. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2022. Vol. 38, No. 4. P. 1127–1140. <https://doi.org/10.1111/jcal.12670>.

22. HD Hyundai receives DNV AiP for cloud-based HiDTS digital twin system. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/news/2024/hd-hyundai-receives-dnv-aip-for-cloud-based-hidts-digital-twin-system/> (date: 09.03.2026).

23. Choi J., Knarr B. A., Youn J.-H., Song K. Y. Machine Learning-Based Approach to Identifying Fall Risk in Seafarers Using Wearable Sensors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 2. Art. 356. <https://doi.org/10.3390/jmse12020356>.

24. Franks A., Parkar S., Hansen C. R. Use of quantitative risk assessment to enhance the safety of ships using ammonia as fuel. *Journal of Safety and Sustainability*. 2024. Vol. 1, No. 3. P. 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.09.004>.

25. Парменова Д. Г., Голікова В. В., Крайнова В. І., Астахов М. В. Аналіз сучасних методів управління безпекою праці на морському транспорті. *Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, 20.03.2025 – 21.03.2025. Одеса: НУОМА, 2025. С. 130 – 133.