

ІНТЕГРАЦІЯ РИЗИК-АНАЛІЗУ В ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ПРИ ЗМІНІ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ

Булгаков М. П., к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: nrbulgaikov2@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7172-8678;

Мельник О. М., д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onm@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459;

Алексішин А. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних комплексів судноводіння, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: aav1978onm@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7666-5674;

Мазур О. М., к.т.н., доцент, доцент кафедри устрою судна, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: mazuronm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9316-288X;

Онищенко О. А., д.т.н., професор, професор кафедри управління судном, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: oleganaton@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3766-3188.

У статті представлено комплексну математичну модель оцінювання ризиків в умовах зниження швидкості руху морських суден, режиму slow steaming, з інтеграцією показників енергоефективності, викидів парникових газів та експлуатаційних витрат. Проведено моделювання для різних типів суден у декількох швидкісних сценаріях, що дозволило визначити зв'язок між економією пального та накопиченням відповідних ризиків, пов'язаних із людським фактором, технічними несправностями та несприятливими погодними умовами. Запропоновано інтегральний показник оцінювання ефективності, що враховує одночасно екологічну вигоду та потенційні витрати на ліквідацію наслідків аварій. Результати симуляцій виявили наявність такого діапазону швидкостей для кожного типу судна, при якому досягається найкращий компроміс між енергоекологічною ефективністю та експлуатаційною безпекою. Динамічне моделювання ризику показало, також, що тривалі рейси без адаптації систем контролю та профілактики призводять до стрімкого зростання витрат на ліквідацію наслідків. Отримані результати мають практичну цінність при плануванні роботи флоту судноплавних компаній із метою розроблення адаптивних до швидкісних режимів руху стратегій управління, які поєднують екологічні цілі із забезпеченням безпеки та фінансової сталості морських перевезень.

Ключові слова: морський транспорт; рух суден; швидкісний режим; повільний хід; судноплавство; ризик-аналіз; енергоефективність; викиди CO₂; технічні несправності; людський фактор; погодні ризики; оптимізація швидкості; інтегральна ефективність; сталий розвиток; сценарне моделювання; оптимізація витрат; профілактика аварій; екологічна безпека; управління ризиками.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.059-068

Вступ. У сучасних умовах глобального потепління та посилення регулювання викидів парникових газів у морській галузі, особливу увагу привертають стратегії, спрямовані на зниження екологічного навантаження від судноплавства. Однією з таких стратегій є такий повільний рух або таке зниження швидкості суден, які забезпечують значне скорочення споживання палива та, що безумовно, одночасно викидів CO₂ на одиницю вантажообігу. Водночас довші за тривалістю рейси, суттєво змінюють умови експлуатації, що потенційно впливає на рівень аварійності та пов'язані з цим ризики. Збільшення тривалості морських переходів призводить до кумулятивного впливу погодних факторів, людського фактора та зносу обладнання, що, у сукупності, може знизити ефективність режиму такого повільного ходу, як загальної стратегії. Таким чином, існує потреба у комплексному аналізі взаємозв'язку між енергоефективністю та рівнем ризику при уповільненні руху суден або їх роботи в режимі зменшених швидкостей, що пов'язано із практичними завданнями

«Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» та затвердженим операційним планом заходів з її реалізації у 2025–2027 роках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Сучасні дослідження з оптимізації за різними критеріями швидкості суден охоплюють дуже широкий спектр використаних методів і підходів. Так, у роботах [1, 6] запропоновані методи багатокритеріальної оптимізації швидкості судна, які враховують критерії енергоефективності та додаткові експлуатаційні фактори. Стратегії, які поєднують керовану зміну швидкості та низки диференціальних параметрів, ретельно розглянуто у [2], зокрема, з урахуванням завантаження судна. У роботах [3, 10] особлива увага зроблена на дотримання екологічних стандартів, наприклад, таких, як показник вуглецевої інтенсивності (СІ), із чітким фокусом на зменшенні CO₂-викидів та покращенні загальної енергоефективності. У статті [4] обговорюється застосування «вдосконаленого алгоритму A*» для спільної оптимізації швидкості та курсу гібридного судна. У роботі [5] пропонується оптимізація маршруту, швидкості та заправки для суден, що працюють на зрідженому природному газі, з урахуванням альтернативних портів бункерування. У роботі [7] аналізуються задачі оптимізації швидкості за змінних метеорологічних умов, а [8, 9] розширюється підхід, що включає впровадження екотехнологій, управління інтервалами та коливання цін на паливо. Нарешті, [11, 12] розглядають конфігурацію двигуна, залежність від його вихідних даних і маршрутизацію для круїзних і лінійних суден, що відкриває перспективи для побудови моделей з низьким обсягом інших вихідних даних і гібридних моделей. Таким чином, наукові джерела підтверджують доцільність комплексної оптимізації швидкості, яка враховує не лише паливну ефективність, але й можливі ризики, зовнішні умови та експлуатаційні обмеження.

Постановка проблеми. Попри численні дослідження з економічного обґрунтування і визначення повільного ходу суден, недостатньо уваги приділено його впливу на загальний ризик аварійності та пов'язані з ним витрати. Більшість моделей оцінки ефективності зосереджені виключно на економії палива і скороченні викидів, ігноруючи потенційне збільшення ризику аварій, людських жертв, технічних відмов або погіршення умов безпеки. Відсутність комплексних моделей, що враховують динамічну зміну ризику в умовах зміни швидкості руху, створює розрив між теоретичними підходами та реаліями експлуатації флоту.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка комплексної моделі оцінювання ризику з урахуванням людських, технічних і погодних чинників, її інтеграція в енергетичні та економічні розрахунки для п'яти типів суден, проведення сценарного моделювання для різних режимів швидкості руху (10–20 вузлів), визначення оптимальних швидкостей із позиції балансу між енергоефективністю, рівнем ризику та витратами на реагування, а також формулювання практичних рекомендацій щодо безпечного впровадження режиму повільного ходу.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу впливу повільного ходу на загальний рівень ризику експлуатації суден розроблено багатофакторну модель, що враховує ймовірності настання аварійних подій на основі трьох ключових тригерів: людський фактор, технічні несправності та погодні умови. Кожен із факторів має свій механізм розвитку у часі, а їхній сукупний ефект визначає загальний профіль ризику рейсу. Всі ймовірності моделюються у динаміці, з урахуванням дій системи контролю та пом'якшення наслідків. Базове рівняння сукупного ризику має вигляд:

$$R = P(T) \times P(A|T) \times P(C|A) - M, \quad (1)$$

де $P(T)$ – ймовірність виникнення тригера (ініціюючої події), $P(A|T)$ – умовна ймовірність аварії при наявності тригера, $P(C|A)$ – ймовірність настання негативних наслідків, M – ефективність пом'якшувальних заходів (страхування, аварійне реагування тощо).

Ймовірність тригера розглядається як комбінація трьох незалежних підсистем:

$$P(T) = 1 - \prod_i (1 - P(T_i)), \quad (2)$$

де $P(T_i)$ – ймовірність окремого тригера, яка містить підсистеми: $P(T_h)$ – людський фактор; $P(T_t)$ – технічна відмова; $P(T_e)$ – вплив зовнішніх (погодних) умов.

Кожен тригер оцінюється окремо. Для людського фактора враховується втома екіпажу та рівень підготовленості (ефективність навчання):

$$P(T_h) = P(F) \times (1 - E_T), \quad (3)$$

де $P(F)$ – ймовірність втоми, E_T – ефективність навчальних заходів.

Технічна надійність судових систем описується експоненційною функцією з урахуванням віку обладнання:

$$P(T_t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

де λ – інтенсивність відмов, t – тривалість рейсу.

Погодні ризики моделюються з урахуванням ймовірності настання несприятливих умов та ефективності роботи моніторингових систем:

$$P(T_e) = P(W) \times (1 - E_W), \quad (5)$$

де $P(W)$ – ймовірність несприятливої погоди, E_W – ефективність прогнозування та запобігання.

Урахування заходів контролю знижує ймовірність тригера:

$$P(T') = P(T) \times (1 - E_C), \quad (6)$$

де E_C – ефективність контрольних заходів (регламенти, автоматизація, трекінг ризиків).

Ймовірність аварії після тригера моделюється експоненційним зростанням ризику:

$$P(A|T) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (7)$$

де μ – інтенсивність розвитку небезпечної ситуації у часі.

Наступним етапом є оцінка наслідків аварії, яка ґрунтується на зваженій сумі компонент:

$$C = \alpha L + \beta E + \gamma F + \delta R, \quad (8)$$

де L – людські втрати, E – екологічні, F – фінансові, R – репутаційні втрати; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – відповідні вагові коефіцієнти.

З урахуванням пом'якшувальних заходів наслідки знижуються:

$$C' = C \times (1 - E_M), \quad (9)$$

де E_M – ефективність систем реагування (пожежогасіння, евакуація, страхування).

Ймовірність тяжких наслідків при аварії має форму:

$$P(C|A) = 1 - e^{-\sigma C}, \quad (10)$$

де σ – коефіцієнт тяжкості наслідків.

Підсумкова модель з урахуванням всіх модифікацій набуває вигляду:

$$R' = P(T') \times P(A|T') \times P(C'|A) - M. \quad (11)$$

Для оцінювання балансу між енергетичними та екологічними вигодами повільного ходу та зростанням ризиків сформовано інтегральний показник ефективності [13]. Цей показник дозволяє кількісно порівнювати сценарії з різною швидкістю ходу за критерієм комплексної доцільності:

$$E_{\text{net}} = \frac{\Delta E_{\text{fuel}} + \Delta CO_2}{R' + C_{\text{res}}}, \quad (12)$$

де ΔE_{fuel} – економія енергії (в одиницях витрат пального або еквіваленту енергії); ΔCO_2 – зменшення викидів CO_2 у порівнянні з базовим режимом; R' – сукупний ризик, отриманий із динамічної моделі; C_{res} – очікувані витрати на ліквідацію наслідків аварій або інцидентів.

Чим вищим є значення E_{net} , тим більш доцільним є сценарій, із погляду визначеної комплексної ефективності, його застосування. Таким чином, даний показник дозволяє об'єднати у єдиний розрахунок і екологічну вигоду, і ризики, що виникають при зміні швидкості.

Таким чином, запропонований алгоритм і модель на його основі, враховують інтегративний вплив швидкості судна на рівень ризику, відображаючи взаємозв'язок між зменшенням технічного навантаження при повільному ході, подовженням періоду впливу погодних чинників та поступовим накопиченням втоми екіпажу. Проведений таким чином аналіз дає змогу визначати оптимальні швидкісні режими, які забезпечують не лише паливну ефективність, а й високий рівень експлуатаційної безпеки та економічно обґрунтовані витрати на ліквідацію можливих аварійних ситуацій.

Візуалізація логіки моделі ризик-аналізу. Побудована модель інтегрує послідовність переходу від первинних факторів ризику до остаточних наслідків аварій. На рис. 1 представлено структурну схему причинно-наслідкових взаємозв'язків між основними елементами ризику в умовах експлуатації суден.

Діаграма охоплює ключові тригери ризику (людський, технічний та екологічний фактори), модифікатори їх дії (навчальні програми, нормативне регулювання, моніторинг), а також засоби пом'якшення та реагування.

Як видно із наведеної схеми, вихідні фактори ризику (втома, знос техніки, погодні умови) можуть активізувати аварійну ситуацію через різні тригери. Втома та інші зміни когнітивних чинників сприяють виникненню людських помилок, які частково усуваються завдяки ефективним навчальним програмам, підвищенню кваліфікації, організації праці та контролю. Технічні збої, спричинені старінням систем або недостатнім або неякісним технічним обслуговуванням, можуть бути мінімізовані шляхом дотримання регламентів. Негативний вплив природних факторів знижується завдяки системам моніторингу, прогнозування і відповідним діям.

Усі ці елементи, у сукупності, можуть призводити до аварій, а їх наслідки, у свою чергу, зменшуються шляхом використання засобів безпеки, роботи рятувальних служб, та екстрених протоколів.

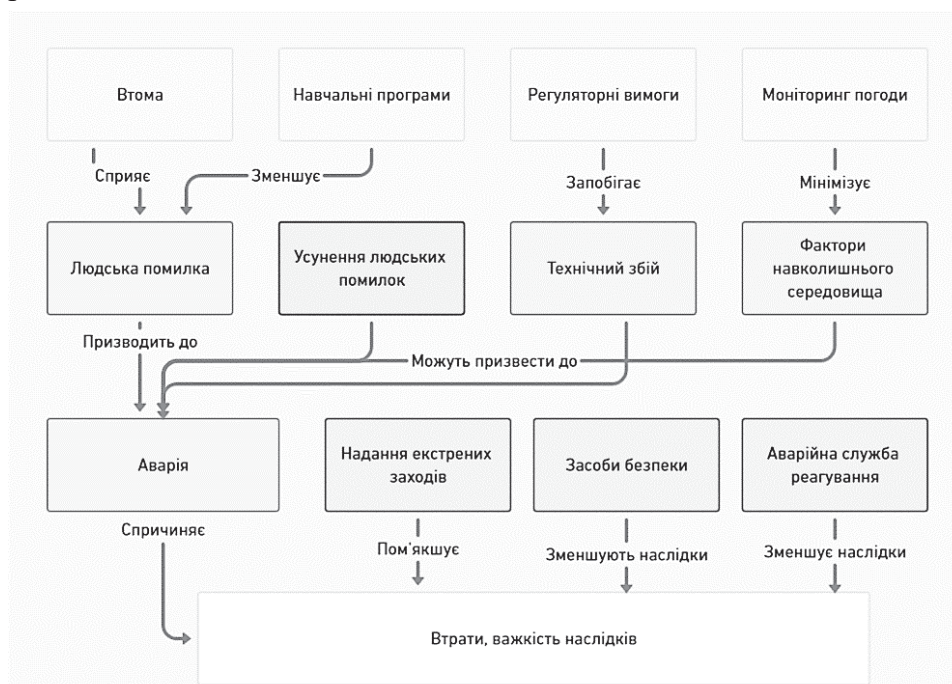


Рисунок 1 – Структурна схема ризик-факторів і механізмів впливу на наслідки аварій

Саме це підкреслює важливість інтегрованого управління ризиками, де швидкість судна лише один із регулювальних параметрів у складній багатофакторній системі.

Результати й обговорення. У межах дослідження проведено імітаційне моделювання еволюції ризику, яке враховує хронологічну зміну впливу трьох основних джерел небезпеки: людського фактора, технічних збоїв та погодних умов.

Кожне джерело розглядається як динамічна змінна, що реагує на час, накопичення втоми, старіння обладнання або тривалість перебування судна в зоні метеорологічної нестабільності. Застосування інтегрованої моделі дозволяє оцінити, як зростає загальний ризик аварій у процесі експлуатації.

На рис. 2 зображено зміну часткових і загального ризиків у часовому вимірі.

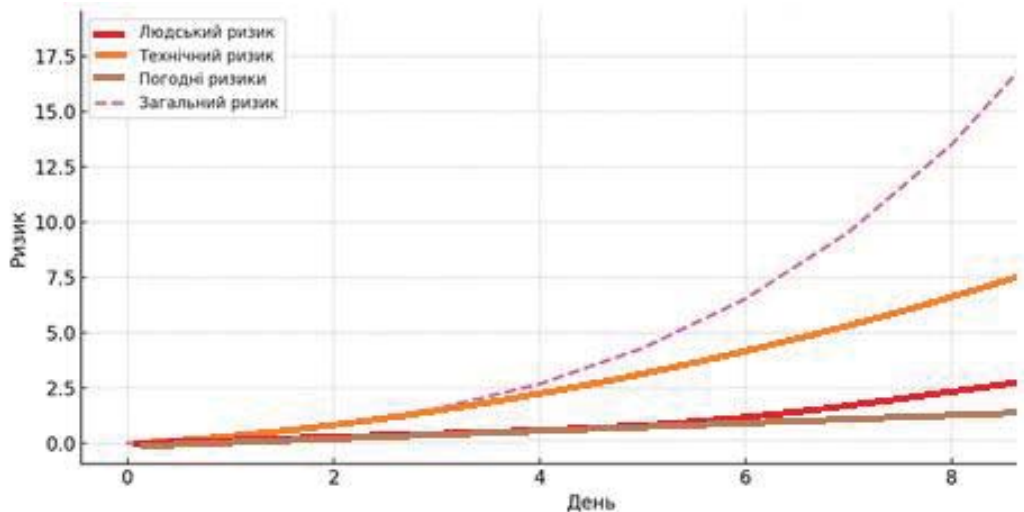


Рисунок 2 – Динаміка ризиків протягом часу: людський, технічний, погодний, загальний

Аналіз графіку, що наведений на рис. 2, показує, що найінтенсивніше зростає технічний ризик, що є наслідком кумулятивного зношення систем і відсутності належного техобслуговування. Людський ризик збільшується помірно, однак залишається стабільним завдяки початковим контрзаходам (тренінги, навчання, вчасні зміни екіпажу). Погодні ризики мають рівномірне зростання, оскільки тривалість перебування в морі пропорційно підвищує ймовірність потрапляння в небезпечні умови. Сукупний ризик демонструє нелінійне зростання, яке стає помітним вже після тижня роботи.

На рис. 3 представлено зміни ефективності аварійного реагування, витрат на запобігання та ліквідацію.

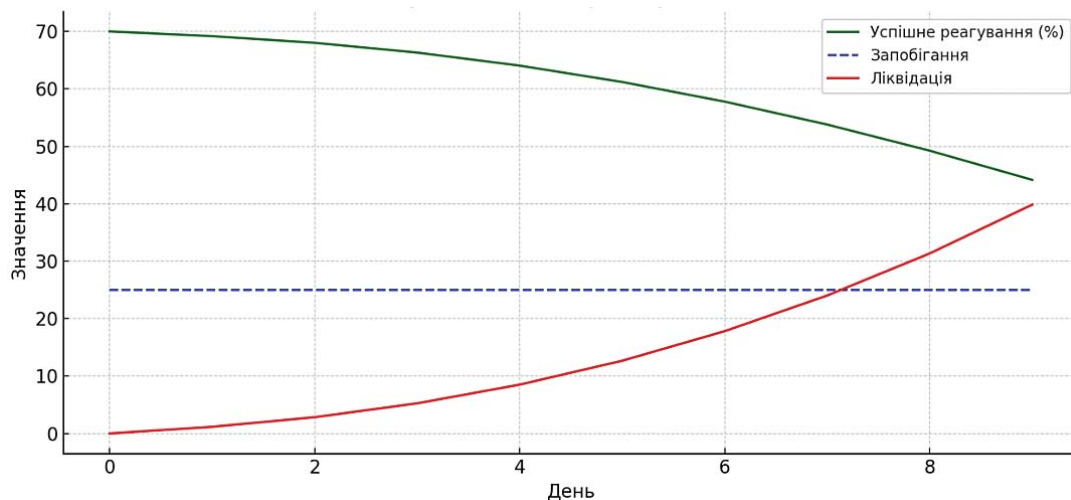


Рисунок 3 – Реагування та витрати у динаміці

Зниження ефективності реагування на надзвичайні ситуації відображає ускладнення умов для рятувальних заходів із часом: втрата ресурсу, втома персоналу, обмеження зв'язку

або логістики. Попри те, що витрати на профілактику залишаються постійними (25 умовних одиниць), витрати на ліквідацію зростають експоненційно, що підтверджує економічну доцільність інвестування в попередження ризиків на ранніх етапах.

Таким чином, хронологічна симуляція підтверджує ключовий висновок: ризики в судноплаванні мають накопичувальний характер, і затягування рейсу (як це проходить при повільному ході) повинне супроводжуватись пропорційним посиленням заходів контролю і відповідних дій, інакше зростають не лише небезпеки, а й економічні втрати.

Щоб кількісно оцінити зміну ризикових характеристик у часовому розрізі, проведено симуляцію 10-денного рейсу з фіксованими умовами експлуатації. У моделюванні враховано поступове зростання трьох основних компонентів ризику: людського, технічного та погодного. Крім того, моделюється ефективність реагування на надзвичайні ситуації та динаміку витрат, як на профілактику, так і на ліквідацію наслідків аварій. Всі обчислення виконувались згідно з алгоритмом побудованої математичної моделі, поданою раніше. У табл. 1 представлено результати динамічного моделювання.

Таблиця 1 – Результати динамічного моделювання ризику протягом 10-денного рейсу

День	Людський ризик	Технічний ризик	Погодні ризики	Загальний ризик	Успішне реагування (%)	Витрати на запобігання	Витрати на ліквідацію
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	70.00	25.0	0.000
1	0.0059	0.0019	0.0049	0.3144	69.18	25.0	1.166
2	0.0114	0.0108	0.0095	0.7924	68.02	25.0	2.832
3	0.0167	0.0297	0.0139	1.5473	66.32	25.0	5.251
4	0.0218	0.0598	0.0181	2.6750	64.05	25.0	8.503
5	0.0267	0.1011	0.0222	4.2906	61.20	25.0	12.665
6	0.0312	0.1543	0.0261	6.5265	57.78	25.0	17.814
7	0.0354	0.2200	0.0297	9.5367	53.79	25.0	24.021
8	0.0393	0.2985	0.0331	13.4979	49.24	25.0	31.346
9	0.0428	0.3904	0.0362	18.6104	44.16	25.0	39.839

З отриманих даних видно, що технічний ризик зростає найінтенсивніше, його значення на дев'ятий день у 20 разів перевищує початкове значення. Людський фактор зростає плавніше, але стабільно, тоді як погодні ризики підвищуються лінійно (за визначеними умовами моделювання). Сукупний ризик (сума всіх компонентів) демонструє експоненційне зростання, після 6-го дня система входить у фазу підвищеної аварійної небезпеки. Успішність реагування падає пропорційно зростанню загроз, а витрати на ліквідацію наслідків зростають більш ніж у 30 разів за весь період. Водночас витрати на запобігання залишаються сталими, що свідчить про потенційну економічну неефективність незмінної системи профілактики в умовах зростаючих ризиків.

Цей аналіз дозволяє робити висновки щодо необхідності адаптивного управління ризиками в динаміці, зокрема, пропорційного збільшення заходів реагування та обслуговування залежно від тривалості рейсу. Такий підхід критично важливий при впровадженні повільного ходу як стратегії сталого судноплавства.

Для оцінювання доцільності впровадження повільного ходу в різних умовах експлуатації проведено порівняльне моделювання інтегрального показника ефективності E_{net} , який враховує сумарну економію енергії, скорочення викидів CO₂, а також ризики та очікувані витрати на ліквідацію аварій. На рис. 4 зображено залежність цього показника від швидкості для п'яти різних типів суден.

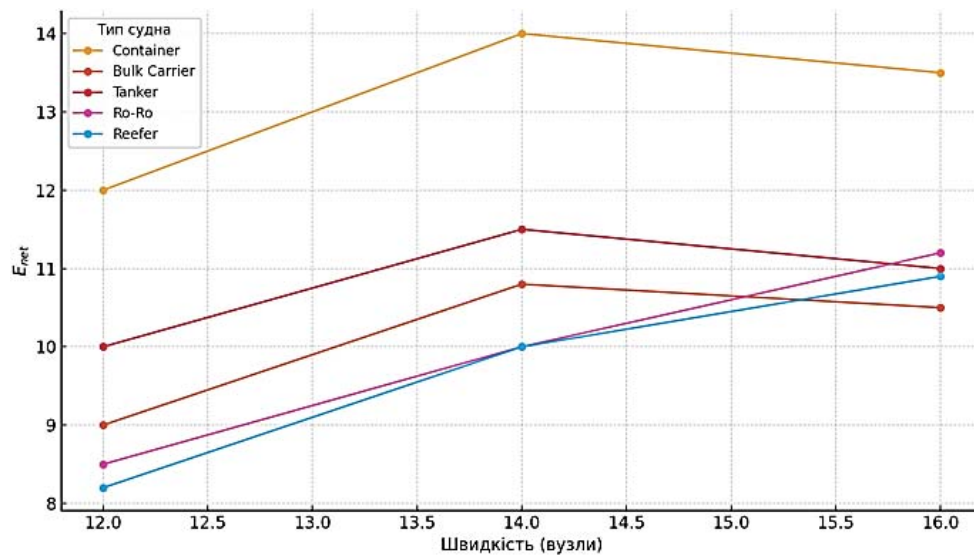


Рисунок 4 – Інтегральна ефективність E_{net} залежно від швидкості для різних типів суден

Аналіз отриманих даних свідчить про наявність характерного профілю ефективності для кожного типу судна.

Так, судна типу контейнеровоз [14] демонструють стабільно високі значення E_{net} у діапазоні 14–16 вузлів, що свідчить про їхню відносну нечутливість до варіацій швидкості в межах типового експлуатаційного режиму. Натомість для *Bulk Carrier* і *Tanker*, що зазвичай працюють на швидкостях 11–13 вузлів, збільшення швидкості хоч і підвищує E_{net} , але супроводжується зростанням ризику та витрат, що ставить під сумнів доцільність прискорення. Для цих суден збереження (або, навіть, зниження) швидкості є раціональною стратегією з позицій безпеки й економіки. У випадку з суднами типу *Ro-Ro* та *Reefer* спостерігається майже лінійне зростання ефективності зі швидкістю, що свідчить про їхню потенційну залежність від скорочення часу рейсу. Водночас ці типи суден можуть потребувати додаткових компенсаторних механізмів, щоб зробити *slow steaming* економічно виправданим.

Дискусійні результати отримані для суден *Ro-Ro* та *Reefer*: у цих випадках E_{net} зростає з підвищенням швидкості, що свідчить про потенційну неефективність повільного ходу для високочутливих або спеціалізованих типів флоту. Ймовірно, додаткові витрати через подовження рейсу переважають вигоди від економії пального, а ризики накопичуються значно швидше.

Отже, інтегральний показник E_{net} дозволяє об'єктивно враховувати складний компроміс між екологічною вигодою та безпекою, виявляючи оптимальні режими роботи суден не лише з погляду витрат, але й з урахуванням ризикової стійкості, а результати можуть бути використані як базис для розробки рекомендацій щодо використання швидкісного режиму для різних типів суден.

Отримані результати демонструють складну і багатовимірну природу впливу повільного ходу на експлуатаційну ефективність суден. З одного боку, зменшення швидкості призводить до помітної економії пального та зниження викидів CO_2 , що відповідає глобальним екологічним цілям. З іншого боку, подовження рейсу супроводжується накопиченням ризиків, що суттєво змінює профіль безпеки операцій. Це підтверджується динамікою зростання загального ризику в симуляції 10-денного рейсу, де на тлі сталих витрат на запобігання спостерігається зростання витрат на ліквідацію наслідків. Інтегральний показник ефективності E_{net} , який поєднує екологічну вигоду та рівень ризику, продемонстрував, що оптимальна швидкість руху не завжди відповідає точці мінімального споживання пального. Для більшості типів суден найкращий баланс досягається в діапазоні 11–13 вузлів, тоді як для спеціалізованих суден (*Reefer*, *Ro-Ro*) ефективність повільного ходу є сумнівною. Це вказує на необхідність індивідуального підходу до впровадження стратегії

slow steaming, із врахуванням типу судна, маршруту, тривалості рейсу та ресурсної структури.

Ключовим висновком моделювання є те, що ризики [15] у судноплавстві мають кумулятивний характер, а їх ефективне стримування потребує адаптивної політики управління від масштабування технічного обслуговування до гнучкої моделі забезпечення екіпажу та інвестицій у якісний моніторинг судових операцій. Статична система заходів безпеки не може адекватно реагувати на зміну операційного середовища в умовах повільного ходу та збільшення тривалості переходів.

Висновки. Запровадження повільного ходу як стратегії підвищення енергоефективності судноплавства має як беззаперечні екологічні вигоди, так і супутні ризики, які потребують комплексної оцінки. Представлена модель оцінок дозволяє враховувати динамічну зміну ризику залежно від швидкості руху, тривалості рейсу та впливу трьох основних факторів: людського, технічного та погодного. Інтеграція моделі ризику в розрахунки дає змогу виявити оптимальні швидкості для кожного типу суден, з урахуванням не лише витрат пального, а й вартості потенційних наслідків аварій.

Результати моделювання, також доводять, що при недостатньому оновленні контрзаходів із часом ризик значно зростає, а витрати на ліквідацію наслідків перевищують своєчасно проведені профілактичні заходи та бюджет. Найбільш доцільною є стратегія адаптивного управління швидкісним режимом і ризиками, що базується на типі судна, маршруті, доступності портової інфраструктури та режимах експлуатації та може бути використаний як основа для розробки рекомендацій при оцінці рішень щодо оптимального режиму руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li X., Sun B., Jin J., & Ding J. Ship speed optimization method combining Fisher optimal segmentation principle. *Applied Ocean Research*, 140, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103743>.
2. Xie X., Sun B., Li X., Zhao Y., & Chen Y. Joint optimization of ship speed and trim based on machine learning method under consideration of load. *Ocean Engineering*, 287, 115917. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115917>.
3. Hua R., Yin J., Wang S., Han Y., & Wang X. Speed optimization for maximizing the ship's economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII). *Ocean Engineering*, 293, 116712. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116712>.
4. Wang C., Huang L., Ma R., Wang K., Sheng J., Ruan Z., Hua Y., & Zhang R. A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A* algorithm. *Ocean Engineering*, 302, 117669. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
5. He P., Jin J. G. Pan W., & Chen J. Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports. *Ocean Engineering*, 305, 117957. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117957>.
6. Li X., Ding K., Xie X., Yao Y., Zhao X., Jin J. & Sun B. Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea. *Applied Ocean Research*, 148, 104012. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104012>.
7. Luo X., Yan R. & Wang S. Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 167, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104827>.
8. Gu Y., Wang Y. & Iris Ç. Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.

9. Gu Y., Wang Y., & Iris Ç. Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.
10. Yan D., Chen C., Gan W., Sasa K., He G. & Yu H. Carbon intensity indicator (CII) compliance: Applications of ship speed optimization on each level using measurement data. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117593. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117593>.
11. Marashian A., Böling J. M., Razminia A., Hyvönen J., Vettor R., Gustafsson W., Pirttikangas M., & Björkqvist J. Combined engine configuration and speed optimization for fuel savings on cruise ships. *Ocean Engineering*, 322, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120387>.
12. Hu C., Wang Y., Han X., Liu H., Sun Q. & Zhou B. Research on speed optimization of fixed route ship with low data dependence. *Ocean Engineering*, 328, 121065. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121065>.
13. IMO GreenVoyage 2050, Energy-Efficiency Technologies Portal. <https://greenvoyage2050.imo.org/energy-efficiency-technologies-information-portal/>.
14. Container-xChange, “How Slow Steaming Impacts Shippers and Carriers”. <https://www.container-xchange.com/blog/slow-steaming/>.
15. Laine V., Valdez-Banda O. & Goerlandt F. Risk maturity model for the maritime authorities: a Delphi study to design the R-Mare matrix model. *WMU J Marit Affairs* 23, 137–163 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00328-z>.

REFERENCES

1. Li, X., Sun, B., Jin, J. & Ding, J. (2023). Ship speed optimization method combining Fisher optimal segmentation principle. *Applied Ocean Research*, 140, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103743>.
2. Xie, X., Sun, B., Li, X., Zhao, Y. & Chen, Y. (2023). Joint optimization of ship speed and trim based on machine learning method under consideration of load. *Ocean Engineering*, 287, 115917. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115917>.
3. Hua, R., Yin, J., Wang, S., Han, Y. & Wang, X. (2024). Speed optimization for maximizing the ship's economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII). *Ocean Engineering*, 293, 116712. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116712>.
4. Wang, C., Huang, L., Ma, R., Wang, K., Sheng, J., Ruan, Z., Hua, Y., & Zhang, R. (2024). A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A* algorithm. *Ocean Engineering*, 302, 117669. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
5. He, P., Jin, J. G., Pan, W., & Chen, J. (2024). Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports. *Ocean Engineering*, 305, 117957. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117957>.
6. Li, X., Ding, K., Xie, X., Yao, Y., Zhao, X., Jin, J. & Sun, B. (2024). Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea. *Applied Ocean Research*, 148, 104012. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104012>.
7. Luo, X., Yan, R. & Wang, S. (2024). Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 167, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104827>.
8. Gu, Y., Wang, Y. & Iris, Ç. (2025). Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.
9. Gu, Y., Wang, Y. & Iris, Ç. (2025). Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.

10. Yan, D., Chen, C., Gan, W., Sasa, K., He, G. & Yu, H. (2025). Carbon intensity indicator (CII) compliance: Applications of ship speed optimization on each level using measurement data. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117593. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117593>.
11. Marashian, A., Böling, J. M., Razminia, A., Hyvönen, J., Vettor, R., Gustafsson, W., Pirttikangas, M. & Björkqvist, J. (2025). Combined engine configuration and speed optimization for fuel savings on cruise ships. *Ocean Engineering*, 322, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120387>.
12. Hu, C., Wang, Y., Han, X., Liu, H., Sun, Q. & Zhou, B. (2025). Research on speed optimization of fixed route ship with low data dependence. *Ocean Engineering*, 328, 121065. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121065>.
13. IMO GreenVoyage 2050, Energy-Efficiency Technologies Portal (2024). <https://greenvoyage2050.imo.org/energy-efficiency-technologies-information-portal/>.
14. Container-xChange, “How Slow Steaming Impacts Shippers and Carriers” (2019). <https://www.container-xchange.com/blog/slow-steaming/>.
15. Laine, V., Valdez-Banda, O. & Goerlandt, F. (2024). Risk maturity model for the maritime authorities: a Delphi study to design the R-Mare matrix model. *WMU J Marit Affairs* 23, 137–163. <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00328-z>.

Bulgakov M., Melnyk O., Aleksishyn A., Mazur O., Onishchenko O. INTEGRATION OF RISK ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AT CHANGING SPEED REGIMES

The article presents a comprehensive mathematical model for risk assessment in slow steaming conditions, integrating energy efficiency, greenhouse gas emissions and operating costs. Simulations for different types of ships in several speed scenarios were carried out, which allowed the determination of the relationship between fuel economy and the accumulation of relevant risks associated with the human factor, technical malfunctions and adverse weather conditions. An integral performance indicator that considers both environmental benefits and potential costs of eliminating the consequences of accidents is proposed. The simulation results have revealed the existence of an optimal speed range for each type of ship, at which the best compromise between energy and environmental efficiency and operational safety is achieved. Dynamic risk modeling has shown that long voyages without the adaptation of control and prevention systems lead to a rapid increase in the cost of eliminating the consequences. The results obtained are of practical value for shipping companies to develop adaptive strategies for managing the speed of vessels that combine environmental goals with ensuring the safety and financial sustainability of maritime transportation.

Key words: maritime transport; vessel traffic; speed mode; slow running; shipping; risk analysis; energy efficiency; CO₂ emissions; technical failures; human factor; weather risks; speed optimization; integrated efficiency; sustainable development; scenario modeling; cost optimization; accident prevention; environmental safety; risk management.

© Булгаков М. П., Мельник О. М., Алексішин А. В., Мазур О. М., Онищенко О. А.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025