

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ЕВАКУАЦІЇ КОРАБЛЯ**

М.М. Масьонкова

Херсонська державна морська академія
20, Ушакова пр., м.Херсон, 73000, Україна
Email: masyonkova@gmail.com

У статті представлено інтелектуальну систему аналізу ризиків для надання комплексної підтримки у прийнятті рішень судноводієм під час надзвичайних ситуацій на всіх етапах евакуаційного процесу. Система складається з трьох взаємопов'язаних моделей, що базуються на байєсівських мережах: модель оцінювання ситуації для визначення необхідності оголошення загальної тривоги та ініціювання процесу евакуації, модель оцінювання збору для постійного контролю ефективності переміщення людей до збірних пунктів та виявлення проблемних зон судна, та модель оцінювання підготовки до залишення судна для прийняття обґрунтованого рішення про остаточну евакуацію. Кожна модель забезпечує динамічне обчислення показника ризику в режимі реального часу, комплексно враховуючи технічний стан судна, поточні та прогнозовані погодні умови, доступність засобів системи пошуку та рятування, близькість інших суден для надання допомоги, відстань від берега та рівень готовності пасажирів і екіпажу. Інтеграція спеціальних вузлів корисності та рішення дозволяє системі надавати конкретні обґрунтовані рекомендації командному складу щодо оптимальних дій у кожній конкретній ситуації. Розроблена інтелектуальна система може суттєво підвищити ефективність рятувальних операцій та значно зменшити людські втрати в критичних ситуаціях на морі, забезпечуючи структуровану науково обґрунтовану підтримку у прийнятті життєво важливих рішень.

Ключові слова: інтелектуальна система, аналіз ризиків, байєсівські мережі, підтримка прийняття рішень, модель судноводія.

Вступ. Загострення геополітичної ситуації та військова агресія росії проти України кардинально змінили безпекову картину світу, створивши нові виклики для морського транспорту. Ескалація конфлікту на морі, включаючи атаки на цивільні судна у Чорному морі та блокування торговельних маршрутів, зростання кількості кібератак на морські судна, актуалізує питання безпеки пасажирів та екіпажу морських суден як ніколи раніше [1, 2]. У таких умовах надзвичайно важливим стає забезпечення ефективних процесів евакуації, які можуть врятувати сотні людських життів.

Процес залишення судна є надзвичайно складною та ризикованою операцією, що вимагає від осіб, відповідальних за безпеку всіх присутніх на борту, прийняття критично важливих рішень в умовах обмеженого часу. Кожен етап евакуаційного процесу по мірі розвитку надзвичайної ситуації характеризується специфічними труднощами та проблемами, які необхідно ефективно вирішувати для успішного завершення евакуації, передусім у контексті управління часом та організації переміщення людей [3]. Цей багатоетапний процес характеризується високим ступенем ризику та потребує значних часових ресурсів, що вимагає постійного та ефективного контролю з боку членів екіпажу.

В умовах сучасних безпекових викликів розробка інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень для евакуації на морському та річковому транспорті набуває особливої актуальності, оскільки може суттєво підвищити ефективність рятувальних операцій та зменшити людські втрати в критичних ситуаціях.

Огляд літератури. Окремі наукові дослідження останніх років зосереджені на розробці та вдосконаленні методів і технологій евакуації морських суден. Ю. Лю та співавтори [4]

розробили стратегію евакуації, яка враховує пропускну здатність маршрутів та рівень ризику для керівництва евакуйованими особами у випадку пожежі. С. Чень та ін. розробили модель динамічної вагової оцінки для наукового та обґрунтованого визначення ризиків безпеки судноплавства, яка об'єднує суб'єктивні та об'єктивні фактори впливу через удосконалений метод аналізу ієрархій та дозволяє подолати недоліки статичного оцінювання завдяки безперервному навчанню на зразках навігаційного середовища та аварій. [5]. Л. Лю та ін. запропонували удосконалену систему мурашиних колоній для вирішення завдань планування евакуаційних маршрутів натовпу на круїзних судах [6]. Ю. Юе та ін. представили загальну модель та методологічну основу для моделювання повного циклу евакуації з круїзного лайнера [7]. З. Лю та співавтори запропонували інноваційний механізм евакуації, який інтегрує просторові характеристики судна з особливостями поведінки людей. Їхньою метою було створення моделі евакуаційного потенціалу морського судна та розробка системи підтримки прийняття рішень в екстрених ситуаціях для організації евакуації як членів екіпажу, так і пасажирів [8]. В. Чжан та ін. створили систему індексів навігаційного ризику для безпілотних суден в складних умовах плавання, використовуючи метод аналізу ієрархій та нечітку комплексну оцінку для визначення ваги факторів ризику та розробки моделі оцінювання, яка враховує особливості безпілотного судна, його сприйняття навколишнього середовища та можливості комунікації. [9]. Х. Чжан та ін. розробили динамічну модель для кількісного визначення каскадного ефекту пожежі в машинному відділенні морського судна [10]. Незважаючи на значні досягнення у цій сфері, залишається потреба у подальшому дослідженні інтелектуальних систем оцінки ризиків, які могли б забезпечити більш ефективну підтримку прийняття рішень в реальному часі під час евакуацій на морському та річковому транспорті.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка інтелектуальної системи аналізу ризиків для надання підтримки у прийнятті рішень судноводієм під час надзвичайних ситуацій на всіх етапах евакуаційного процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі **завдання**:

- розробити інтелектуальну систему аналізу ризиків для надання інформаційної підтримки судноводію у прийнятті рішень під час надзвичайних ситуацій на кожному етапі процесу евакуації;
- визначити систему взаємопов'язаних моделей, що базуються на байєсівських мережах: модель оцінювання ситуації, модель оцінювання збору та модель оцінювання підготовки до залишення судна;

Інтелектуальна система аналізу ризиків. Інтелектуальна система аналізу ризиків спрямована на покращення розуміння ситуації судноводієм у складних обставинах евакуації та надання допомоги у прийнятті рішень протягом всього циклу управління надзвичайною подією. Для реалізації цього завдання система виконує постійне оцінювання ризиків, що дозволяє в реальному часі визначати рівень небезпеки, пов'язаної з операціями до початку та протягом евакуації. Інтелектуальна система аналізу ризиків включає три окремі моделі, що відповідають ключовим етапам евакуації: аналіз ситуації, організація збору людей та підготовка до залишення судна. Кожна модель забезпечує динамічне обчислення показника ризику за ґрадуйованою шкалою. Інформація про характер ризиків передається командному складу миттєво для забезпечення обґрунтованого прийняття рішень.

Метою інтелектуальної системи аналізу ризиків є підвищення ситуаційної обізнаності судноводія в несприятливих умовах, що превалюють протягом евакуаційного процесу, а також забезпечення підтримки прийняття рішень щодо управління життєвим циклом інциденту/аварії. Для досягнення цієї мети інтелектуальна система аналізу ризиків здійснює динамічне оцінювання ризиків з метою кількісного визначення в режимі реального часу ризику, пов'язаного з діяльністю до та під час процесу евакуації. Запропонована інтелектуальна система складається з трьох різних

моделей, які охоплюють основні фази евакуації (оцінювання кризової ситуації, збір та підготовка до залишення судна). Кожна модель передбачає динамічний розрахунок індексу ризику за порядковою шкалою. Характеристика ризику надається в режимі реального часу судноводію для ефективної підтримки прийняття рішень, заснованих на ризику.

Модель оцінювання ситуації. Модель оцінювання ситуації активується після виникнення інциденту/аварії через згенерований сигнал. Її основною метою є підтримка рішення судноводія щодо того, чи потрібно оголосити загальну тривогу для ініціювання процесу евакуації. Оцінка базується на стані безпеки судна та рівні впливу небезпечних факторів на пасажирів.

Модель оцінювання збору. Модель оцінювання збору активується після оголошення загальної тривоги та спрямована на кількісне визначення ефективності процесу збору з точки зору затримок і того, чи знаходяться пасажирів під загрозою під час переміщення до збірних пунктів. Основна функція полягає в допомозі членам екіпажу у визначенні тих зон судна, де можуть знадобитися запобіжні та/або коригувальні дії протягом процесу збору. Результатом є рівень ризику затримки, який розраховується для зон судна, розподілених за основними вертикальними зонами та конкретною палубою судна.

Модель оцінювання підготовки до залишення судна. Модель оцінювання підготовки до залишення судна також активується після оголошення загальної тривоги. Вона спрямована на надання розуміння того, чи більше судно не є безпечним для людей на борту, та підтримує рішення капітана про віддання наказу покинути судно. Оцінка враховує стан судна (який активний з моменту виявлення інциденту), уразливість людей після залишення судна та готовність до покидання. Результат оцінки надає рекомендацію судноводію та капітану.

Застосування інтелектуальної системи аналізу ризиків. Використання інтелектуальної системи аналізу ризиків відбувається у два основних етапи (рис. 1).



Рис. 1. Етапи застосування інтелектуальної системи аналізу ризиків

Усі три компоненти інтелектуальної системи аналізу ризиків базуються на байєсівських мережах. Це орієнтовані ациклічні графічні структури, де випадкові величини та вузли пов'язані напрямленими з'єднаннями, що демонструють статистичні та випадкові взаємозв'язки між елементами [11].

Створення ризик-моделей інтелектуальної системи аналізу ризиків передбачає наступні кроки:

I етап:

- ідентифікація факторів та показників, які впливають на рівень ризику при евакуації морських суден (на основі дослідження аварійних випадків, аналізу наукових публікацій та експертних оцінок);
- побудова ризик-моделей, включаючи структурування зв'язків між виявленими ризиковими факторами з урахуванням думки експертів та математичне обґрунтування байєсівських мереж;
- перевірка створених ризик-моделей.

II етап:

- перегляд та коригування моделей на основі коментарів експертів;
- валідація моделей.

Модель оцінювання ситуації. Модель призначена для формування висновку щодо тяжкості післяаварійної ситуації, яка залежить від можливості локалізації інциденту, безпосереднього впливу небезпечних умов на пасажирів та здатності судна забезпечити безпечні умови для пасажирів і екіпажу.

У моделі враховано наступні фактори ризику [12]:

- плавучість, остійність та водонепроникність;
- структурна цілісність;
- протипожежна безпека;
- стан критичних систем для керуваності та навігації судна;
- стан критичних систем зв'язку (внутрішнього та зовнішнього).

Модель оцінювання збору. Спрямована на оцінювання ефективності процесу збору з точки зору часу та за аспектами, описаними нижче. Модель враховує наступні фактори ризику [3]:

- стан допоміжних систем;
- евакуаційні можливості;
- доступність засобів для евакуації;
- потік пасажирів у зоні.

Основними факторами ризику, що впливають на терміновість залишення судна, є: стан судна, який залежить від локалізації інциденту, стану корпусу судна (включаючи плавучість, остійність, водонепроникність та структурну цілісність) і стану навігаційних систем (тобто здатності судна до керування); рівень готовності людей і засобів масової евакуації (суден) до залишення судна.

Байєсівська мережа моделі оцінювання підготовки до залишення судна. При розробці структури моделі байєсівської мережі основою стала ідентифікація факторів ризику, що впливають на терміновість залишення судна, (рис. 2).

Побудована байєсівська мережа для оцінювання збору включає такі вузли системи пошуку та рятування :

- **Близькість інших суден для порятунку** визначає можливість надання допомоги іншими суднами щодо рятування пасажирів, які покинули судно з рятувальними човнами. Близькість інших суден залежить від щільності судноплавства в даному районі та від того, чи знаходяться поблизу судна, здатні реагувати на сигнали лиха, як частина вимог Міжнародної конвенції про пошук і рятування на морі (Конвенція SAR). Висока щільність означає, що пасажирів матимуть високі шанси на рятування, в той час як низька щільність зменшує шанси на рятування та збільшує ризик екологічних небезпек після залишення судна.
- **Доступність засобів пошуку та порятунку** визначає час, який потрібен засобам системи пошуку та порятунку для прибуття на місце аварії, що залежить від відстані до найближчого рятувального центру і поточних погодних та морських умов.

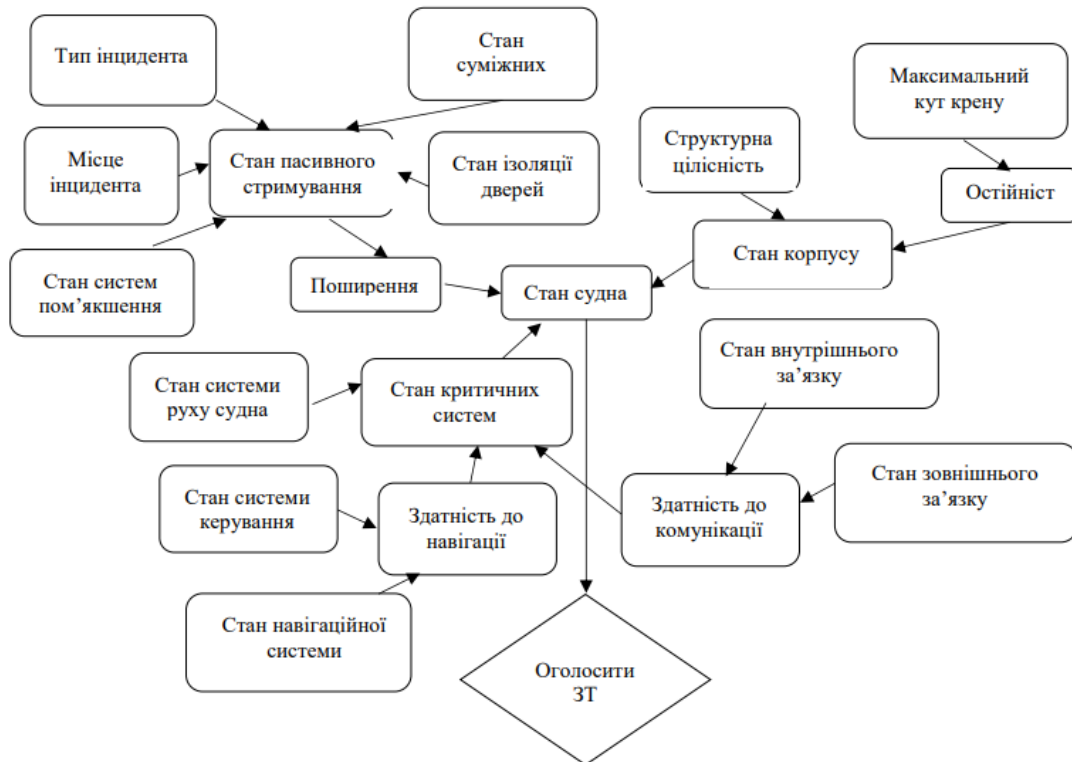


Рис. 2. Байєсівська мережа моделі оцінювання ситуації аналізу ризиків

- **Стан зовнішніх засобів** вказує, чи очікується надання допомоги після залишення судна або літакові засоби покинули судно. Це залежить від мобілізації системи пошуку та порятунку та відстані. Зовнішні засоби рятування очікуються, коли власті системи пошуку та порятунку повідомлені і знаходяться на шляху, а найближчі судна закриті до місця аварії у морі для надання допомоги.
- **Відстань від берега** вказує, чи можуть пасажирів після залишення судна дістатися до берега безпечно протягом розумного часу. Якщо це трапляється поблизу берега, пасажирів мають вищу ймовірність врятування навіть у найгіршому сценарії (наприклад, рятувальні човни).
- **Очікувані погодні умови.** Інформація про поточні погодні умови береться у формі 3-годинного прогнозу. Справедливі, помірні та суворі характеристики засновані на силі вітру та висоті хвиль. Суворі погодні умови збільшують час рятування більше ніж в 7 разів (суворо). Суворі погодні умови збільшують ймовірність 30-хвилинного навантаження людських збитків. Екстремальні температури (дуже холодні) також впливають на вразливість пасажирів.
- **Вразливість після залишення судна.** Стан вибору має потенційні несприятливі наслідки для безпеки пасажирів після впливу навколишньої небезпеки. Це залежить від того, як швидко їх можна доставити до безпеки вдома або на борт іншого судна чи на берег або на переважаючі погодні умови. Низькі рівні вразливості пов'язані з мінімальним впливом, або зі справедливими чи помірними погодними умовами (незалежно від часу до SAR) або зі швидкою системою пошуку та порятунку (незалежно від переважаючих умов).
- **Доступність засобів (суден) масової евакуації.** Вказує, чи судна масової евакуації пошкоджені, недоступні або загрожують підходу для нової посадки та залишення судна. Вони можуть бути доступними, якщо вони не зазнали пошкоджень до такої міри, що їх можливість плавання та водонепроникність порушені, і якщо вони безпечно доступні для нової посадки пасажирів.

- **Максимальний кут крену** вказує, чи система спуску суден масової евакуації здатна працювати як призначено, враховуючи кут крену судна. MEV можуть працювати в межах максимального кута крену і пошкодження, які система може зазнати від аварії. Судна масової евакуації будуть здатні до спуску лише якщо вони не зазнали якихось серйозних пошкоджень або їх системи спуску або їх конструкції, і якщо максимальний кут крену судна відповідає LSA коду [13].
- **Статус запуску суден масової евакуації** вказує кількість пасажирів, які прибули на збірні станції як відсоток від загальної кількості пасажирів на борту. Всі очікувані пасажирів повинні прибути на збірні станції, щоб мати можливість організувати судно. Пасажирів повинні бути готові до посадки на MEV перш ніж почати посадку на суднах масової евакуації. Конкретні відсотки можуть розглядатися як параметр, що можна налаштувати відповідно до специфічних властивостей судна
- **РАХ (Пакс) на станціях збору** вказує кількість пасажирів, які прибули на збірні станції як відсоток від загальної кількості пасажирів на борту. Всі очікувані пасажирів повинні прибути на збірні станції, щоб мати можливість організувати судно.
- **Готовність залишення судна.** Це оцінка ситуації перед покиданням судна з урахуванням впливу на безпеку пасажирів, якщо вони (1) залишаються на борту на своїх призначених збірних станціях, або (2) сідають на судна масової евакуації, евакуюються з судна та чекають на засоби системи пошуку та порятунку. Оцінка залежить від цілісності судна та операційного стану його підсистем з урахуванням інциденту та ступеня, до якого він був локалізований, потенційного впливу на безпеку людей з урахуванням наказу про залишення судна та готовності до покидання. Альтернативи рішення для судноводія/капітана, які підтримуються цією оцінкою, полягають у тому, щоб затримати та додатково оцінити ситуацію або негайно віддати наказ про залишення судна.

Аналогічно до моделі оцінки ситуації, в модель байєсівської мережі були включені вузол корисності та вузол рішення для оцінки того, чи потрібно віддавати наказ про залишення судна, базуючись на його «корисності» відповідно до станів кінцевого вузла шансів «Терміновість залишення судна».

Конкретно, кінцевий вузол шансів з'єднується з вузлом корисності. "Корисність" кожної альтернативи рішення оцінюється за якісною шкалою від 1 до 3 як "нагорода". Наприклад, видання наказу про залишення судна, коли терміновість залишення судна низька, розглядається як небажаний результат, який штрафується через вузол корисності, оскільки це може непотрібно піддати пасажирів екологічним небезпекам після залишення судна. Це також було підтверджено відгуками, отриманими під час експертних інтерв'ю. З іншого боку, видання наказу про залишення судна при помірній та/або високій терміновості залишення судна є бажаним результатом, який нагороджується через вузол корисності, оскільки це сприяло б захисту здоров'я та безпеки людей на борту. Оцінка кожної альтернативи рішення (тобто залишити, залишитися та перевірити) виходить як сума добутку корисностей з ймовірностями кожного стану кінцевого вузла шансів. Альтернатива з найвищим результатом є рекомендованим рішенням.

Висновки. У роботі запропоновано інтелектуальну систему аналізу ризиків для підтримки прийняття рішень судноводієм під час надзвичайних ситуацій на морських суднах. Система спрямована на покращення безпеки евакуаційних процесів та зменшення людських втрат у критичних ситуаціях, що особливо актуально в умовах сучасних геополітичних викликів та загострення безпекової ситуації на морі.

Розроблено комплексну систему, що складається з трьох взаємопов'язаних моделей, які охоплюють ключові етапи евакуаційного процесу: оцінювання ситуації, організацію збору людей та підготовку до залишення судна. Всі компоненти системи базуються на байєсівських мережах, що забезпечує ефективне моделювання невизначеності та складних взаємозв'язків між факторами ризику в умовах обмеженої інформації. Система забезпечує постійний моніторинг та оцінювання ризиків у режимі реального часу, що дозволяє своєчасно реагувати на зміни ситуації та приймати обґрунтовані рішення. Ідентифіковано та систематизовано широкий спектр факторів ризику, включаючи технічний стан судна, погодні умови, доступність рятувальних засобів, близькість інших суден та готовність пасажирів до евакуації.

Інтеграція вузлів корисності та рішення дозволяє системі надавати конкретні рекомендації щодо необхідності оголошення загальної тривоги або віддання наказу про залишення судна. Запропонована інтелектуальна система аналізу ризиків може суттєво підвищити ефективність управління надзвичайними ситуаціями на морських судах. Система забезпечує судноводіям інформаційну підтримку у прийнятті критично важливих рішень, що може призвести до значного зменшення часу реагування та покращення результатів евакуаційних операцій.

Наступним етапом досліджень буде валідація розроблених моделей на основі реальних даних про морські аварії, інтеграцію системи з існуючими судновими системами безпеки та розширення функціональності для врахування специфічних типів суден та характеру надзвичайних ситуацій.

Список літератури

1. Cong L., Zhang H., Wang P., Chu C., Wang J. Impact of the Russia–Ukraine Conflict on Global Marine Network Based on Massive Vessel Trajectories. *Remote Sensing*. 2024. 16(8):1329.
2. Kovalchuk O., Shynkaryk M., Masonkova M., Banakh S. Cybersecurity: Technology vs Safety. 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany. 2020. P. 765–768.
3. Koimtzoglou, A., Themelis, N., Ventikos, N.P., Louzis, K., Koimtzoglou, M., Giannakis, K., Panagiotidis, P., Moustogiannis, S., Ramiro, M., Peña, J., et al. Assessing the Risk during Mustering in Large Passenger Vessels: A Digital Tool for Real Time Decision Support. In *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies*. CRC Press: Boca Rato. FL, USA. 2022. P. 269–276.
4. Liu, Y., Zhang, H., Zhan, Y., Deng, K., Dong, L. Evacuation Strategy Considering Path Capacity and Risk Level for Cruise Ship. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. P. 398.
5. Chen S., Wu L., Xie C., Zhou L., Wang R., Liu Z., Zhu Q., Zhu L. Risk Evaluation of Navigation Environment Based on Dynamic Weight Model and Its Application. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(6):770.
6. Liu L, Zhang H, Xie J, Zhao Q. Dynamic Evacuation Planning on Cruise Ships Based on an Improved Ant Colony System (IACS). *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. Vol. 9. P. 220.
7. Yue, Y., Gai, W.M., Deng, Y.F. Influence factors on the passenger evacuation capacity of cruise ships: Model-ling and simulation of full-scale evacuation incorporating information dissemination. *Process Saf. Environ. Protection*. 2022. Vol. 157. P. 466–483.
8. Liu, Z., Li, Y., Zhang, Z., Yu, W. A New Evacuation Accessibility Analysis Approach Based on Spatial Information. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022. Vol. 222 P. 108395.
9. Zhang W, Liu Z, Ma X. Research on Navigation Risk Assessment of Unmanned Ship Under Complex Navigation Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(11):1947.
10. Zhang, H., Li, C., Zhao, N., Chen, B.-Q., Ren, H., Kang, J. Fire Risk Assessment in Engine Rooms Considering the Fire-Induced Domino Effects. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. P. 1685.

11. Huang, Y., van Gelder, P.H.A.J.M. Time-Varying Risk Measurement for Ship Collision Prevention. *Risk Anal.* 2020. Vol. 40. P. 24–42.
12. Ventikos, N.P., Themelis, N., Louzis, K., Koimtoglou, A., Michelis, A., Koimtoglou, M., Ragab, A. Evaluating Risk During Evacuation of Large Passenger Ships: A Smart Risk Assessment Platform for Decision Support. In *Trends in Maritime Technology and Engineering*. CRC Press: London. UK. 2022. Vol. 2. P. 283–294.
13. Hänninen, M. Bayesian Networks for Maritime Traffic Accident Prevention: Benefits and Challenges. *Accid. Anal. Prev.* 2014. Vol. 73. P. 305–312.

SMART RISK ANALYSIS SYSTEM FOR DECISION SUPPORT DURING SHIP EVACUATION

M.M. Masonkova

Kherson State Maritime Academy
20, Ushakov ave., Kherson, 73000, Ukraine
Email: masyonkova@gmail.com

The escalation of the geopolitical situation and Russia's military aggression against Ukraine have fundamentally changed the world's security landscape, creating new challenges for maritime transport. The escalation of conflict at sea, including attacks on civilian vessels in the Black Sea and the blockade of trade routes, makes the issue of passenger and crew safety on ships more urgent than ever before. The process of abandoning ship is an extremely complex and risky operation that requires those responsible for safety to make critically important decisions under conditions of limited time and high uncertainty. The article presents an intelligent risk analysis system for providing comprehensive decision support to navigators during emergency situations at all stages of the evacuation process. The system consists of three interconnected models based on Bayesian networks: a situation assessment model for determining the need to declare general alarm and initiate the evacuation process, a muster assessment model for continuous monitoring of the effectiveness of people's movement to assembly stations and identifying problematic areas of the ship, and an abandon ship preparation assessment model for making informed decisions about final evacuation. Each model provides dynamic real-time risk indicator calculations, comprehensively considering the ship's technical condition, current and predicted weather conditions, availability of search and rescue system resources, proximity of other vessels for assistance, distance from shore, and the readiness level of passengers and crew. The integration of special utility and decision nodes allows the system to provide specific justified recommendations to the command staff regarding optimal actions in each particular situation. The developed intelligent system can significantly improve the efficiency of rescue operations and substantially reduce human losses in critical situations at sea, providing structured, scientifically-based support for making vital decisions.

Keywords: smart system, risk analysis, Bayesian networks, decision support, navigator model.