

Бойко А. Д., Горалік Є. Т.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СУМАРНИХ ВИТРАТ НА ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ І ЛІКВІДАЦІЇ ОЧІКУВАНОГО ЗБИТКУ ВІД АВАРІЙНИХ МОРСЬКИХ ПОДІЙ

Відповідно до вимог Міжнародного Кодексу по Управлінню Безпекою кожна судноплавна компанія повинна розробляти, втілювати в життя і підтримувати системи управління безпекою. Метою роботи є підвищення ефективності системи управління безпекою судноплавства. Відповідно до мети в роботі з урахуванням особливостей управління безпекою судноплавства на морі виявлено наявність протиріччя в предметній області, що досліджується. З однієї сторони необхідно визначити такий рівень підвищення безпеки судноплавства для кожної судноплавної компанії, який буде оптимальним з точки зору економіки судноплавної компанії і безпеки судноплавства. А з іншої відсутні ефективні формальні методи та моделі вирішення задач управління факторами ризиків аварійних морських подій, що забезпечують мінімізацію витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від аварійних морських подій. В статі розроблена математична модель сумарних витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від аварійних морських подій в системі управління безпекою судноплавства з урахуванням ефективності відповідних заходів. Запропонована математична модель сумарних витрат дозволяє визначити цільовий рівень підвищення системи управління безпекою судноплавства при мінімальних сумарних витратах на впровадження необхідних заходів.

Ключові слова: судноплавство, система управління безпекою, модель, аварійна морська подія, імовірність, фактор, витрати, заходи.

Вступ. Відповідно до вимог Міжнародного Кодексу по Управлінню Безпекою (ISM Code) кожна судноплавна компанія повинна розробляти, втілювати в життя і підтримувати системи управління безпекою. Система управління безпекою (СУБ) – це структурована і документована система, яка дозволяє персоналу судноплавної компанії та іншим підприємствам морського і річкового транспорту ефективно провадити її політику в галузі забезпечення безпеки та захисту довкілля [1].

На даний час застосовуються різні методи в СУБ судноплавства в частині ідентифікації, аналізу, зниження рівня ризиків аварійних морських подій. Аварійна морська подія (АМП) – це подія, що виникла в результаті експлуатації судна чи у зв'язку з нею, яка спричинила, або могла спричинити людські жертви, або заподіяти шкоду здоров'ю людей, загибель судна, або втрату його морехідного стану, а також забруднення навколишнього природного середовища [2, 3].

При цьому на безпеку експлуатації морського судна впливає значна кількість факторів і вплив цих факторів може мати різні негативні наслідки. Досягти абсолютної безпеки неможливо, при цьому витрати на забезпечення безпеки судноплавства мають

тенденцію до постійного зростання, в той же час дефіцит вкладень в забезпечення безпеки судноплавства може привести до АМП. У зв'язку з цим необхідний механізм визначення першочергових ризиків і найбільш ефективних заходів щодо зниження їх рівня таким чином, щоб забезпечувався збалансований розподіл витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від АМП.

Анализ літератури. Проблема впровадження і функціонування СУБ судноплавства на морському транспорті присвячено багато робіт. Серед них можна виділити роботи [4 - 7] та інші. Дослідження, виконані в цій області, пов'язані з оцінкою, аналізом, розрахунком ступеня тяжкості, імовірності ризику, методологією побудови СУБ судноплавства тощо. Але питання, що стосуються підвищення ефективності СУБ судноплавства в частині проведення заходів, оптимальних з точки зору економіки судноплавної компанії, щодо зниження ризиків АМП на даний час фактично не опрацьовані, в тому числі з точки зору формалізації процесу їх вирішення. Так безпосередньо відсутні формальні методи та моделі вирішення задач управління факторами ризиків АМП, що забезпечують мінімізацію витрат на заходи для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від АМП.

Метою роботи є підвищення ефективності системи управління безпекою судноплавства за рахунок розробки математичної моделі сумарних витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від аварійних морських подій.

Основна частина. Однотипні АМП, які відбуваються за одними і тими ж або різними причинами та призводять до однотипних наслідків, утворюють однорідний потік подій, що відрізняються між собою часом появи.

У зв'язку з тим, що всі АМП є достатньо рідкісними і незалежними подіями, то можливо прийняти, що вони підпорядковуються закону Пуассона [8]. З огляду на це ймовірність появи АМП (emergency maritime event) $P(EME_j)$, які розподіляються згідно із законом Пуассона, може бути формально визначена відповідно до виразу

$$P(EME_j) = \lambda_j \times T, \quad (1)$$

де λ_j – інтенсивність потоку однорідних АМП;

T – час експлуатації судна.

Будь-яка АМП може бути наслідком декількох факторів (причин) [**Ошибка! Закладка не определена.**]. Кожен фактор має свою частку у виникненні АМП. У конкретній АМП мають місце свої фактори, що формально представляють собою повну групу подій, а частка фактору АМП є умовною імовірністю того, що АМП відбулася через цей фактор

$$\sum_{i=1}^I P(F_i/EME_j) = 1, \quad (2)$$

де F_i – фактор АМП, $i = \overline{1, I}$, I – кількість факторів;

EME_j – АМП, $j = \overline{1, J}$, J – кількість АМП.

При цьому імовірність $P(F_i/EME_j)$ не характеризує тяжкість наслідків АМП EME_j .

Кожна АМП, обумовлена навіть одним і тим же фактором (або декількома факторами), буде призводити до свого збитку. В зв'язку з цим для кожного фактору за

результатами статистичних даних визначається середня величина очікуваного збитку \overline{A}_{j_i} як середнє арифметичне. Збиток безпосередньо пов'язаний з ризиком. Ризик виникнення АМП EME_j по одному фактору будемо визначати згідно виразу

$$R_i = \lambda_j \times T \times \overline{A}_{j_i} \times P(F_i/EME_j). \quad (3)$$

Математичне сподівання ризику виникнення АМП EME_j з урахуванням впливу всіх факторів будемо визначати виразом

$$R_j = \lambda_j \times T \times \sum_{i=1}^I (\overline{A}_{j_i} \times P(F_i/EME_j)). \quad (4)$$

Сумарний ризик виникнення декількох АМП (які є по відношенню один до одного різнорідними) будемо визначати виразом

$$R_{EME} = \sum_{j=1}^J R_j = T \times \sum_{j=1}^J (\lambda_j \times \sum_{i=1}^I (P(F_i/EME_j) \times \overline{A}_{j_i})). \quad (5)$$

Для зниження або запобігання рівня ризиків АМП виконується сукупність відповідних заходів. Тоді імовірність запобігання АМП P_k^{pr} представимо як відношення інтенсивності потоку АМП певного типу після впровадження заходів, до інтенсивності потоку цих подій, яка була до впровадження заходів

$$P_k^{pr}(M_n/F_i) = \lambda_k^{bef}(M_n/F_i) / \lambda_k^{aft}(M_n/F_i), \quad (6)$$

де $\lambda_k^{bef}(M_n/F_i)$ – вихідна інтенсивність потоку k -го типу АМП до впровадження заходів M_n щодо зниження ризиків;

$\lambda_k^{aft}(M_n/F_i)$ – інтенсивність потоку АМП k -го типу з урахуванням заходів, що запобігають АМП.

При цьому, якщо $\lambda_k^{aft}(M) < \lambda_k^{bef}(M)$ та $\lambda_k^{aft}(M) > 0$, то виконання заходів M дозволяє попередити частину АМП. У разі, якщо $\lambda_k^{aft}(M) = 0$, то виконання заходів M дозволяє попередити всі АМП, а якщо $\lambda_k^{aft}(M) = \lambda_k^{bef}(M)$, то всі АМП відбуваються.

По кожному фактору АМП може виконуватися кілька заходів щодо зниження ризику і один захід може забезпечувати запобігання кількох факторів. Якщо виконується кілька заходів, то витрати на впровадження заходів N щодо зниження ризиків підсумовуються, а результуюча імовірність $P_k^{pr}(M/F_i)$ запобігання дорівнює добутку імовірностей запобігання подій за підсумками впровадження кожного заходу M_n , котрий знижує ризик подій. Результуюча імовірність запобігання АМП по фактору F_i та j -му АМП з урахуванням кількох заходів N будемо визначати відповідно до виразу

$$P_k^{pr}(M_j/F_i) = \prod_{n=1}^N P_k^{pr}(M_{jn}/F_i). \quad (7)$$

При цьому, якщо імовірність запобігання АМП за результатами впровадження заходів щодо зниження ризиків АМП дорівнює нулю, то заходи є неефективними і всі АМП в цьому випадку відбуваються. Якщо імовірність запобігання АМП за результатами

впровадження заходів щодо зниження ризиків АМП прагне до одиниці, то заходи є ефективними.

Відповідно до виразу (6), сумарне значення ризику для всіх АМП при впровадженні заходів, спрямованих на зниження ризику АМП, з урахуванням виразу (7), будемо визначати відповідно до виразу

$$R_{EME}^{pr} = T \times \sum_{j=1}^J \left[\lambda_j \times \sum_{i=1}^I \left(P(F_i/EME_j) \times \bar{A}_{ji} \times (1 - \prod_{n=1}^N P_k^{pr}(M_{jn}/F_i)) \right) \right]. \quad (8)$$

Скорочення ризику виникнення АМП від впровадження попереджувального заходу, в свою чергу, визначимо згідно виразу

$$\Delta R_{EME} = R_{EME} - R_{EME}^{pr}. \quad (9)$$

З метою забезпечення або підвищення безпеки мореплавання компаніями можуть розроблятися і застосовуватися різні заходи, спрямовані на усунення людських, технічних факторів та факторів, пов'язаних з зовнішніми впливами і докільям, наприклад: вдосконалення навчальних тренажерів; підвищення якості професійної підготовки персоналу, вдосконалення технології технічного обслуговування та ремонту і т.д. Вираз для визначення витрат K_{EME} для реалізації відповідних заходів представимо у наступному вигляді

$$K_{EME} = - \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{0jni} \ln \left(1 - P_k^{pr}(M_{jn}/F_i) \right), \quad (10)$$

де C_{0jni} – постійна процесу, яка характеризує швидкість його зміни.

Безпека мореплавання зі збільшенням вкладень фінансових коштів в заходи запобігання буде підвищуватися, але при цьому ефективність додаткових вкладень в заходи може бути нижче, ніж при первинному вкладенні до певного рівня P_{opt}^{pr} . Таким чином, важливо визначити таке значення P_{opt}^{pr} , з якого ефективність вкладень буде знижуватися. При цьому, пошук оптимального значення рівня безпеки мореплавства повинен бути виконаний з урахуванням параметра ефективності (в даному випадку імовірності запобігання АМП), який характеризує рівень зниження ризиків АМП (ефективність заходів) і вартість заходів. Імовірність запобігання АМП характеризує якість СУБ мореплавання.

Певна пропорція між сумарними витратами і імовірністю запобігання буде забезпечувати найбільшу ефективність забезпечення безпеки мореплавання. З огляду на це, як параметр оптимізації прийнята імовірність P^{pr} , а в якості критерію оптимізації – мінімальні сумарні витрати. Імовірність запобігання АМП та мінімальні сумарні витрати визначаються для кожного типу АМП. Згідно цього встановлюється відповідна класифікація критеріїв мінімальних сумарних витрат.

Виходячи з виразів для вкладень в забезпечення безпеки мореплавання (10) і ризику реалізації АМП (8), сумарні витрати будемо визначати на основі наступної математичної моделі сумарних витрат (при дискретних величинах):

$$A_{all} = R_{EME}^{pr} + K_{EME} =$$

$$= T \times \sum_{j=1}^J \left[\lambda_j \times \sum_{i=1}^I \left(P(F_i/EME_j) \times \bar{A}_{ji} \times \left(1 - \prod_{n=1}^N P_k^{pr}(M_{jn}/F_i) \right) \right) \right] - \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{0jni} \ln \left(1 - P_k^{pr}(M_{jn}/F_i) \right). \quad (11)$$

Розроблена математична модель сумарних витрат дозволяє визначити цільовий рівень підвищення безпеки мореплавання при мінімальних сумарних витратах.

Висновки. В роботі відповідно до особливостей управління безпекою судноплавства на морі виявлено наявність протиріччя в предметній області, що досліджується. З однієї сторони необхідно визначити такий рівень підвищення безпеки судноплавства для кожної судноплавної компанії, який буде оптимальним з точки зору економіки судноплавної компанії і безпеки судноплавства. А з іншої відсутні ефективні формальні методи та моделі вирішення задач управління факторами ризиків аварійних морських подій, що забезпечують мінімізацію витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від аварійних морських подій. В статі розроблена математична модель сумарних витрат на впровадження заходів для запобігання і ліквідації очікуваного збитку від аварійних морських подій в системі управління безпекою судноплавства з урахуванням ефективності відповідних заходів. Запропонована математична модель сумарних витрат дозволяє визначити цільовий рівень підвищення системи управління безпекою судноплавства при мінімальних сумарних витратах на впровадження необхідних заходів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському і річковому транспорті, затверджене наказом Міністерства транспорту України від 20.11.2003 р. № 904 // Офіційний вісник України. – 2003. – № 52. – Т. 2. – Ст. 2844.
2. Інструкція про порядок здійснення контролю за виконанням судноплавними компаніями України нормативних актів з питань безпеки судноплавства, затверджена наказом Міністерства транспорту та зв'язку України 26.11.2004 р. № 1048 // Офіційний вісник України. – 2004. – № 50. – Ст. 3304.
3. Положення про Державну систему управління безпекою судноплавства, затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 7.10.2009 р. № 1137 // Офіційний вісник України. – 2009. – № 83. – Ст. 2810.
4. Мельник О.Н. Експлуатація неспеціалізованих суден при транспортуванні негабаритних і великовагових вантажів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Мельник Олександр Ніколаєвич; ОНМУ. - Одеса, 2021. - 24 с.
5. Митрофанова Н.В. Методические основы оценки человеческого фактора в системе управления рисками судоходных компаний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.05 / Митрофанова Надежда Владимировна; СПГУВК. - Санкт-Петербург, 2007. – 24 с.
6. Нычик Т.Ю. Оценка риска аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Нычик Татьяна Юрьевна; ВГАВАТ. - Од Санкт-Петербург, 2007. - 24 с.
7. Обертюр К.Л. Підвищення безпеки експлуатації суден методами управління подіями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Обертюр Костянтин Леонідович; НУ ОМА. - Одеса, 2017. - 21 с.

8. Качинский А. Б. Засады системного аналізу безпеки складних систем [Текст] /А. Б. Качинский. – К.: ДП «НВЦ» Євроатлантикінформ, 2006. – 336 с.

Boyko A.D., Horalick Ye.T.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF TOTAL COSTS FOR THE INTRODUCTION OF MEASURES TO PREVENT AND REMOVE EXPECTED LOSS FROM MARINE EVENTS

According to the requirements of the International Code of Safety Management, each shipping company must develop, implement and maintain safety management systems. The purpose of the work is to improve the efficiency of the navigation safety management system. According to the purpose of the work, taking into account the peculiarities of managing the safety of navigation at sea, the presence of a contradiction in the subject area under study was revealed. On the one hand, it is necessary to determine the level of navigation safety improvement for each shipping company, which will be optimal from the point of view of the shipping company's economy and navigation safety. On the other hand, there are no effective formal methods and models for solving the problems of managing the risk factors of emergency marine events that ensure minimization of the costs of implementing measures to prevent and eliminate the expected damage from emergency marine events. The article develops a mathematical model of the total costs for the implementation of measures to prevent and eliminate the expected damage from emergency marine events in the navigation safety management system, taking into account the effectiveness of the relevant measures. The proposed mathematical model of total costs makes it possible to determine the target level of improving the navigation safety management system with the minimum total costs for the implementation of the necessary measures.

Key words: *shipping, safety management system, model, emergency marine event, probability, factor, costs, measures.*