

Тимошук О.М., Мельник О.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ ПРИ БУНКЕРУВАННІ СУДЕН

Прийнятний рівень ризику при проведенні бункерування визначається тими витратами, які готове нести суспільство для досягнення безпеки. Оптимальність співвідношень залежить від рівності між витратами на забезпечення безпеки і ціною збитків від аварій [1]. При обґрунтуванні вимог до рівня ризику необхідно враховувати як прийнятну концепцію аварійності і травматизму, так і накопичений до теперішнього часу досвід при експлуатації засобів водного транспорту [2]. Звідси випливає необхідність визнати об'єктивно існуючі ризики, зокрема при проведенні бункерування, і навчитися їх нормувати, застосовуючи такі способи: вибір величини показників ризику відповідно значень, які встановлено в морській галузі; обґрунтування оптимальних за обраними критеріями кількісних показників ризику.

Склад заходів можна оцінити рішенням оптимізаційної задачі – при мінімальних витратах, вибрати такий набір заходів, впровадження яких знижує ймовірність аварії до допустимого (заданого) рівня.

При вирішенні задачі прийнято, що кошти виділяються на покращення шести найбільш значних факторів, що включають як безпеку обладнання і технологій, так і факторів діяльності людини, які мають найбільший вплив на безпеку проведення процесу бункерування: готовність технічних засобів бункерування, підготовка персоналу, проведення технічного обслуговування, ремонт, резервування обладнання, якість прийняття рішень при бункеруванні [3]. Визначено вартісні характеристики мір впливу на фактори безпеки бункерування. Була розроблена багатофакторна модель оцінювання грошових витрат на міри впливу на безпеку бункерування. Імітаційне моделювання грошових витрат здійснювалось за допомогою рівномірного розподілу випадкових величин на заданому проміжку, а також нормального розподілу з заданими параметрами (математичним сподіванням та середнім квадратичним відхиленням).

Ключові слова: безпека бункерування, фактори безпеки, багатофакторна модель оцінювання грошових витрат, імітаційне моделювання грошових витрат.

Постановка проблеми. Вибрати такий набір заходів, впровадження яких знижує ймовірність аварії до допустимого (заданого) рівня. Оптимізаційна задача вирішується за допомогою побудови багатофакторної моделі. Розраховуються різні сценарії реалізації факторів та моделюються відповідні значення грошових витрат та ймовірності настання аварійної ситуації. З метою зменшення ймовірності виникнення аварії (досягнення допустимого рівня) з мінімальними витратами визначається доцільність використання наявних фінансових ресурсів на забезпечення безвідмовної роботи технічних засобів бункерування та резервування обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Вагомий науковий внесок у вирішення проблеми вдосконалення системи комплексного обслуговування флоту і його бункерування внесли М.А.Государев, В.Н.Захаров, Н.П.Малашенко, В.П.Маталін, А.К.Медведев, Н.С.Радюкін, Л.М.Рижов, А.І.Телегін, В.М.Федюшин та ін [4; 5; 6]. Але недостатньо уваги приділялось дослідженню удосконалення системи бункерування, з урахуванням

основних факторів небезпек, які можуть призвести до аварійних ситуацій з розливами нафти, що негативно впливає на екологію та завдає матеріальних збитків.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Розробка математичної багатофакторної моделі оцінювання мір впливу на безпеку бункерування, яка відрізняється від відомих врахуванням ресурсного забезпечення набору заходів, впровадження яких дозволить знизити ймовірність аварії до допустимого рівня.

Мета статті. Провести імітаційне моделювання та розробити багатофакторну математичну модель оцінювання мір впливу на безпеку бункерування.

Виклад основного матеріалу. Після вирішення питання про оцінку ймовірності виникнення аварії при бункеруванні потрібно виконати вирішити задачу оптимізації необхідних мір безпеки при її проведенні.

Постановка оптимізаційної задачі:

При мінімальних витратах $\sum_i S_i$, на удосконалення безпеки технологічного процесу бункерування, необхідно вибрати такий набір мір, який дозволить знизити ймовірність аварій $Q_{\text{доп}} = P_{\text{доп}}(A)$ до допустимого (заданого) рівня $P_{\text{доп}}(A)$

$$\sum_i S_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$Q_{ik} - \sum_i \Delta Q_i \leq P_{\text{доп}}(A), \quad (2)$$

де S_i , – витрати на впровадження i -го комплексу мір для підвищення безпеки, Q_{ik} – вірогідність аварій після впровадження прийнятих мір по підвищенню безпеки,

$\Delta Q_i = (Q_c - Q_{ic})$ – зниження вірогідності аварії при впровадженні i -го набору мір по покращенню безпеки.

При вирішенні задачі приймаємо, що кошти виділяються на покращення шести найбільш значних факторів, що включають як безпеку обладнання і технологій, так і факторів діяльності людини, які мають найбільший вплив на безпеку проведення процесу бункерування: готовність технічних засобів бункерування, підготовка персоналу, проведення технічного обслуговування, ремонт, резервування обладнання, якість прийняття рішень при бункеруванні [7 – 10]. Вартісні характеристики мір впливу на фактори безпеки надані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вартісні характеристики мір впливу на фактори безпеки бункерування (20000\$-40000\$)

Найменування фактору	Позначення	Вартісна оцінка фактору, \$
Готовність технічних засобів бункерування	x_1	3000-6000
Підготовка персоналу	x_2	1000-2000
Проведення технічного обслуговування	x_3	2000-4000
Ремонт	x_4	4000-8000
Резервування обладнання	x_5	4000-8000
Якість прийняття рішень при бункеруванні	x_6	6000-12000

Багатофакторна модель оцінювання грошових витрат на міри впливу на безпеку бункерування:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^6 a_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k} c_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (3)$$

де x_i, x_j, x_k – незалежні змінні, що характеризують значення факторів, наведених в таблиці 1, $i, j, k \in \{1, 2, \dots, 6\}$ – індекси незалежних змінних;

b_0 – параметр моделі (перетин регресії), що визначає теоретичне значення результуючого показника за умови, що всі незалежні змінні набуватимуть нульових значень;

b_i – параметри лінійної складової моделі, що визначають коефіцієнти перед змінними в першому степені;

a_{ij} – параметри квадратичної складової моделі, що визначають коефіцієнти многочлена другого порядку;

c_{ijk} – параметри кубічної складової моделі, що визначають коефіцієнти многочлена третього порядку.

В моделі було враховано вплив шести виділених факторів, а також можливість виникнення сумісних подій (пар та трійок).

При цьому значення факторів моделювались в певних діапазонах, кожен з яких відповідав певному рівню фінансово-організаційного забезпечення фактора та рівню безпеки.

Таблиця 2 – Характеристика основних областей зміни факторів

Значення фактора	Рівень впливу фактора	Рівень безпеки
[0; 0,25]	Низький	Критичний. Характеризується: високою ймовірністю настання ризикових ситуацій, низьким рівнем передбачуваності ризику, низькою готовністю ліквідувати аварійні або небезпечні ситуації, ризикова ситуація може привести до зупинки роботи системи.
[0,25; 0,5]	Достатній	Підвищеного ризику. Характеризується: середньою ймовірністю настання ризикових ситуацій, середньою готовністю ліквідувати аварійні або небезпечні ситуації, ризикова ситуація може привести до зміни цілей роботи системи або її зупинки.
[0,5; 0,75]	Середній	Допустимого ризику. Характеризується: середньою ймовірністю настання ризикових ситуацій, високою готовністю ліквідувати аварійні або небезпечні ситуації, ризикова ситуація може привести до часткової зміни цілей роботи системи, але не до її зупинки.
[0,75; 1]	Високий	Мінімального ризику. Характеризується: низькою ймовірністю настання ризикових ситуацій, високою готовністю ліквідувати аварійні або небезпечні ситуації, ризикова ситуація може привести до часткової короточасної зміни цілей роботи системи, але не до її зупинки.

Імітаційне моделювання грошових витрат здійснювалось за допомогою рівномірного розподілу випадкових величин на заданому проміжку, а також нормального розподілу з заданими параметрами (математичним сподіванням та середнім квадратичним відхиленням).

В результаті було отримано модель виду (2) з наступними параметрами (таблиця 3).

Таблиця 3 – Параметри багатфакторної моделі

Змінна	Параметр	Значення параметра	Рівень надійності
	b_0	10277,47	0,9956
x_1	b_1	-8642,01	0,9864
x_2	b_2	-10557,8	0,9803
x_3	b_3	-9956,79	0,9482
x_4	b_4	549,3862	0,7256
x_5	b_5	979,4043	0,6306
x_6	b_6	11027,99	0,9955
x_1x_2	a_{12}	6795,961	0,9858
x_1x_3	a_{13}	12609,08	0,9899
x_1x_4	a_{14}	373,7258	0,1258
x_1x_5	a_{15}	4287,722	0,9291
x_1x_6	a_{16}	1393,238	0,3519
x_2x_3	a_{23}	15729,41	0,9978
x_2x_4	a_{24}	9969,566	0,9624
x_2x_5	a_{25}	-1553,88	0,4782
x_2x_6	a_{26}	-6305,46	0,8937
x_3x_4	a_{34}	-6103,85	0,8351
x_3x_5	a_{35}	7941,842	1,0000
x_3x_6	a_{36}	-562,723	0,1616
x_4x_5	a_{45}	-931,598	0,1387
x_4x_6	a_{46}	1987,346	0,5404
x_5x_6	a_{56}	-2394,33	0,3100
$x_1x_4x_6$	c_{146}	7498,991	0,7766
$x_2x_4x_6$	c_{246}	7552,22	0,9596
$x_3x_4x_6$	c_{346}	6807,915	0,8558
$x_5x_4x_6$	c_{546}	8143,585	0,5175

Для кожного параметру було знайдено рівень впливу – ймовірність прийняття гіпотези про статистичну значущість обчислених значень.

Зауважимо, що для більшості параметрів рівні впливу достатньо близькі до 1, що говорить про високу точність отриманих значень.

Для перевірки адекватності моделі було обчислено:

множинний коефіцієнт кореляції: $\bar{R} = 0,9895$; його значення близьке до 1, що свідчить про те, що зміна результуючого показника з високою ймовірністю пояснюється зміною факторів;

коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0,9790$; його значення також близьке до 1, що свідчить про адекватність побудованої моделі;

стандартна похибка моделі становить $\sigma_e = 1462$ \$;

значущість спостережуваного значення критерію Фішера становить $5,66 \cdot 10^{-5}$ що говорить про те, що з ймовірністю не меншою 0,99 приймається гіпотеза про адекватність побудованої моделі.

Застосування моделі.

За допомогою побудованої багатфакторної моделі було розраховано різні сценарії реалізації факторів та змодельовано відповідні значення грошових витрат та ймовірності настання аварійної ситуації. При цьому було отримано розв'язки оптимізаційної задачі виду:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^6 a_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,k} c_{ijk} x_i x_j x_k \rightarrow \min \quad (4)$$
$$\begin{cases} P(A) \leq P_0, \\ 0 \leq x_i \leq 1, \quad i = \overline{1,6}. \end{cases}$$

Склад заходів можна оцінити рішенням оптимізаційної задачі – при мінімальних витратах, вибрати такий набір заходів, впровадження яких знижує ймовірність аварії до допустимого (заданого) рівня. Заданий рівень частоти аварійного розливу нафти приймемо рівним $\lambda_{\text{доп}} = 8,3 \cdot 10^{-4}$ 1/год, що відповідає зоні умовно прийнятного ризику. Ймовірність виникнення події (аварійний розлив нафти при бункеруванні), відповідно вказаній частоті розливу, складе $P_{\text{доп}}(A) = 1,67 \cdot 10^{-5}$. У таблиці 4 наведені результати оптимізації, в якій представлено можливі виборки заходів, відсортованих за обраним критерієм мінімальні витрати, необхідні для зниження величини ймовірності аварії до заданого рівня. Представлено 10 вибірок заходів, що вимагають мінімальних витрат.

Аналіз результатів, приведених в таблиці 4, дозволяє зробити висновок про те, що процес оптимізації дозволяє понизити ймовірність виникнення інцидентів (аварійний розлив нафтопродуктів) до заданого рівня за рахунок використання мінімальних коштів (20 380 доларів США).

Таблиця 4 – Результати мінімізації витрат для зниження ймовірності виникнення аварій до заданого рівня $P_{\text{доп}}(A) = 1,67 \cdot 10^{-5}$

	Вірогідність аварій $\cdot 10^{-5}$	Фактор 1 x_1	Фактор 2 x_2	Фактор 3 x_3	Фактор 4 x_4	Фактор 5 x_5	Фактор 6 x_6	Витрати \$
1	1,36	1	1	1	1	1	1	39190
2	2,89	0,6	0,2	0,5	0,3	0,1	0,7	27790
3	1,95	0,9	0,2	0,0	0,6	0,7	1,0	29280
4	1,69	0,8	0,7	0,7	0,4	0,8	0,7	20380
5	2,41	0,1	0,0	0,0	0,9	1,0	0,8	20700
6	2,56	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	27260
7	2,44	0,3	0,6	0,0	0,9	0,7	0,2	275780
8	2,79	0,6	0,1	0,6	0,0	0,2	1,0	28920
9	3,05	0,2	0,8	0,1	0,8	0,4	0,0	20070
10	1,61	0,6	0,9	0,7	0,4	0,8	0,9	28765

При цьому значення чинника x_1 – готовність технічних засобів бункерування – (0,8); чинник x_2 – підготовка персоналу – (0,7); чинник x_3 – проведення технічного обслуговування – (0,7); чинник x_4 – ремонт – (0,4); чинник x_5 – резервування обладнання – (0,8); чинник x_6 – якість прийняття рішень при бункеруванні (0,7).

Це свідчить, що з метою зменшення ймовірності виникнення аварії (досягнення допустимого рівня) з мінімальними витратами найбільш доцільно використовувати наявні фінансові ресурси на забезпечення безвідмовної роботи технічних засобів бункерування та резервування обладнання. Вірогідність виникнення аварій становитиме $1,69 \cdot 10^{-5}$. Частота, аварійного розливу нафти при бункеруванні буде дорівнювати: $\lambda_c = 8,45 \cdot 10^{-4}$ 1/рік. Отримана величина знаходиться в зоні допустимого ризику ($1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5}$). Ризик можна вважати прийнятним.

Таким чином, розроблений метод, який включає імітаційну модель часових станів при проведенні бункерування, екологічну модель виливів забруднюючих речовин і математичну багатофакторну модель оцінювання грошових витрат фінансових ресурсів на забезпечення безвідмовної роботи технічних засобів бункерування та резервування обладнання, впливатиме на безпеку бункерування та підвищення ефективності експлуатації засобів водного транспорту.

Висновки. Розглянуто метод зниження ймовірності виникнення аварійних подій в процесі бункерування транспортних суден.

Розглянуто принципи оптимізації показників ризику і безпеки. Встановлено, що прийнятний рівень ризику в техносфері визначається тими витратами, які погоджується нести суспільство задля забезпечення безпеки. Тобто, оптимальність співвідношень залежить від рівності між витратами на забезпечення безпеки і ціною збитків від передбачуваних техногенних аварій.

З використанням методу імітаційного моделювання і оптимізації його результатів показано рішення задачі підвищення безпеки бункерування транспортних суден. З метою зменшення ймовірності виникнення аварійних подій і досягнення нею заданого рівня ($1,69 \cdot 10^{-5}$) при відповідній частоті аварійного розливу нафти при бункеруванні $\lambda c = 8,45 \cdot 10^{-4}$ 1/рік (зона допустимого ризику) за рахунок використання мінімальних коштів (20380 доларів США) найбільш доцільно використовувати наявні фінансові ресурси на забезпечення безвідмовної роботи технічних засобів бункерування та резервування обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дичко А. О., Єремєєв І. С. Аналіз ризиків і менеджмент водних екосистем. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2018. № 4. С. 115–122.
2. Karahalios H., Yang Z. L., Wang J. A risk appraisal system regarding the implementation of maritime regulations by a ship operator. *Maritime Policy & Management*. 2015. Vol. 42. №. 4. P. 389-413.
3. Никитин А. М. Построение системы технического обслуживания судна на основе управления рисками. Эксплуатация морского транспорта. СПб : ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2006. Вып. № 2. С. 46-54.
4. Государев М. А. Пути повышения эффективности системы снабжения топливом транспортного флота. Передовой опыт и новая техника. ЦБНТИ МРФ. - Вып. 4 (52), 1976. С. 27-29.
5. Захаров В. Н. Совершенствование системы оперативного управления комплексным обслуживанием транспортных судов в портах: дисс. на соиск. уч. степени к.т.н. : Горький, 1970. 232 с.
6. Малашенко Н. П. Методика определения продолжительности операций комплексного обслуживания судов в портах. Труды НИВТа. Вып. 82, 1972. С. 36-42.
7. Bunker Fuel: Supply, Demand and Pricing. Bunkerworld Business Exchange.— [Electronic resource]. Retrieved from <http://www.iea.org/statistics/> (дата звернення 20.11.2021).
8. Онищенко О. А., Голіков В. А. Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии. Вісник Одеського національного морського університету, 2017. №. 37. С 13-28.
9. Шишкин В. А. Техническая эксплуатация флота и судов. Бункеровка судов: учебное пособие. СПб.: СПбГУВК, 2008. 162 с.
10. Аварійність світового флоту: причини і уроки. URL: <http://www.seaman.com.ua/articles/025/> (дата звернення 18.11.2021).

REFERENCE

1. Dychko, A.O., Yermieiev I.S. (2018), "Analysis of risks and management of water ecosystems", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 4(52), no. 4(52), pp. 27-29.
2. Karahalios H., Yang Z. L., Wang J. (2015), "A risk appraisal system regarding the implementation of maritime regulations by a ship operator", *Maritime Policy & Management*, vol. 42, no. 4, pp. 389-413.
3. Nikitin A. M. (2006), "Building a ship maintenance system based on risk management". *Operation of sea transport, Saint Petersburg State Maritime Academy named after Admiral Makarov*, vol. 2, no. 2, pp. 46-54.

4. Gosudarew M. A. (1976) Ways to improve the efficiency of the transport fleet fuel supply system. Advanced experience and new technology. TsBNTI MRF, vol. 4, no. 4, pp. 115-122.
5. Zaxarow, W. N. (1970), "Improvement of the system of operational management of complex services for transport ships in ports ", dissertation for the degree of candidate of technical sciences, Gorky institute of water transport, Gorky, Russia.
6. Mala[enko N. P. (1972), "Methodology for Determining the Duration of Complex Service Operations for Vessels in Ports" Proceedings of NIVT, vol. 82, no.82, pp. 36-42.
7. Bunkernoe toplivo: predlozhenie, spros i ceny. Biznes-birzha, "Bunker Fuel: Supply, Demand and Pricing. Bunkerworld Business Exchange". available at: <http://www.iea.org/statistics/> (accessed November 20, 2021).
8. Onyschenko O. A., Holikov V. A. (2017), "Development of modern theory and practice of technical operation of the sea and river fleet: concepts, methods, technologies ". Bulletin of Odessa National Maritime University, vol. 37, no. 37, pp. 13-28.
9. Shishkin V. A. Texniheskaq \kspluatatsiq flota i sudov. Bunkeroverka sudov: uhebnoe posobie. [Technical exploitation of the fleet and ships. Bunkering of ships: tutorial]. Saint Petersburg, SPBGUVK, 2008. 162 p.
10. World Navy Accidents: Causes and Lessons. available at: <http://www.seaman.com.ua/articles/025/> (accessed November 18, 2021).

Timoshchuk O.M., Melnik O.V.

OPTIMIZATION OF SAFETY MEASURES IN SHIP BUNKING

The acceptable level of risk in bunkering is determined by the costs that society is willing to bear to achieve security. The optimality of the ratio depends on the equality between the cost of safety and the cost of damage from accidents . When substantiating the requirements for the level of risk, it is necessary to take into account both the accepted concept of accidents and injuries, and the experience gained so far in the operation of water transport. Hence the need to recognize objectively existing risks, in particular during bunkering, and learn to normalize them, using the following methods: choosing the value of risk indicators in accordance with the values set in the maritime industry; substantiation of optimal quantitative risk indicators according to the selected criteria.

The composition of measures can be assessed by solving the optimization problem - at minimal cost, choose a set of measures, the implementation of which reduces the likelihood of an accident to an acceptable (specified) level.

In solving the problem, it is assumed that the funds are allocated to improve the six most important factors, including safety of equipment and technology, and factors of human activity that have the greatest impact on the safety of the bunkering process: readiness of technical means of bunkering, staff training, maintenance , repair, redundancy of equipment, the quality of decision-making in bunkering. The cost characteristics of measures to influence bunkering safety factors are determined. A multifactor model for estimating cash expenditures as they affect bunkering security has been developed. Simulation modeling of money costs was carried out using a uniform distribution of random variables over a given interval, as well as a normal distribution with given parameters (mathematical expectation and standard deviation). Keywords: security, reliability, bunkering, hazard identification, risks.

Keywords: bunkering security, security factors, multifactor model of estimating money costs, simulation modeling of money costs.