

*Постніков Є.Є.*

## МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ БУКСИРУВАННІ СЕЙСМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

*В статті удосконалено модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання. Особливістю моделі є її базування на теорії дифузійних процесів взаємодії активаторних сил середовища та інгібіторних сил на буксирній лінії, що забезпечує навігаційну безпеку буксирної системи з маломорехідним об'єктом, траєкторія якого асимптотично прагне до траєкторії буксирувальника, і дозволяє розрахувати ризики переходу буксируємої системи у небезпечний стан навігації із заданою ймовірністю і визначити часовий інтервал, протягом якого дана система буде знаходитись у навігаційній безпеці при розробці плану маршруту буксирування.*

**Ключові слова:** буксирування, людський фактор, морський транспорт, навігаційна ситуація, небезпеки, сейсмічне обладнання.

### **Вступ.**

Аварійність при проведенні буксирувальних операцій є об'єктивною реальністю, обумовленою, насамперед, зовнішніми й внутрішніми факторами, що супроводжують таку небезпечну операцію, і не завжди залежить від людини.

Впливаючи на ризики, можна досягти їх зниження лише до певного рівня на якомусь часовому проміжку, після чого вони знову почнуть зростати або, у кращому випадку, будуть тимчасово стабілізовані на кількісному або якісному рівні.

Для забезпечення безпечного буксирування сейсмічного обладнання виникає необхідність у створенні комплексу заходів [1, 2], що зводять до мінімуму вплив невірних прийнятих рішень на загальний стан безпечної експлуатації всієї системи буксирування. Основою цього комплексу заходів є система управління ризиками [3].

Основним фактором аварій на морі, які можуть перерости в надзвичайні ситуації, є порушення в сфері безпеки судноплавства. Статистика свідчить, що більшість з цих порушень призводять до навігаційних аварій. У свою чергу, найпоширенішою причиною навігаційних аварій, присутніх в 80% від їх кількості, є помилки судноводія [4, 5]. Таким чином, саме людський елемент ергатичної системи “судноводій”–“судно”–“середовище” в основному визначає ризик виникнення надзвичайної ситуації на морських суднах.

Однак завдання мінімізації ризику навігаційної ситуації, особливо при буксуванні маломорехідного об'єкту, може бути вирішене тільки за допомогою обґрунтування та впровадження ефективних процедур управління ризиком, перелік яких містить у собі ідентифікацію та прогнозування (оцінку) ризику, виявлення його факторів, обґрунтування та реалізацію заходів щодо зміни статусу цих факторів. Метою цих заходів є досягнення такого мінімального ризику навігаційної ситуації, що можливо лише за існуючих обставин та умов судноплавства. Вони можуть бути спрямовані як на зниження ймовірності виникнення навігаційної ситуації, так і на зменшення її наслідків.

### **Аналіз літературних джерел.**

Завдання оцінювання ризиків навігаційних ситуації при виконанні буксирувальних операцій маломорехідних об'єктів знайшло рішення у роботах як вітчизняних, так і

закордонних дослідників й має декілька напрямків наукового дослідження.

Дослідниками, на роботи яких спирається автор, є Вагущенко Л.Л. [6], Мальцев А.С. [7], Нечаєв Ю.І. [8], Піпченко О.Д. [9, 10], Asuelimen G., Blanco-Davis E., Wang J [11], Fossen T.I. [12].

**Метою статті** є удосконалення модель оцінювання навігаційної безпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання.

**Основна частина.**

Характерною рисою моделі безпечного плавання є розглянуті спрямовані переходи системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” з режиму безпечного плавання в режим небезпечного плавання, тобто урахування ризиків. Даний напрямок дослідження обумовлений необхідністю контролю стану безпеки навігації, при якому можна здійснювати рух по заданій смузі положення й з урахуванням фіксованої ймовірності знаходження сейсмічного обладнання та буксирувальника в цій смузі. Стан навігаційної безпеки при стаціонарному плаванні за заданим планом переходу курсу можна описати векторним лінійним рівнянням.

Припустимо, що для системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” зафіксована подія  $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \Sigma$ , яка показує, що має місце асимптотичне спрямування траєкторії сейсмічного обладнання до траєкторії буксирувальника. При асимптотичному спрямуванні траєкторії "маломорехідного" об'єкта до траєкторії буксирувальника переважають активаторні властивості середовища.

Взаємодія активаторних сил середовища та інгібіторних сил, що існують на буксирній лінії, може реалізовуватися в рамках математичних моделей дифузійних процесів. Якщо далі вважати цю гіпотезу можливою, то стан навігаційної безпеки системи при стаціонарному русі за заданим планом переходу курсу можна описати векторним лінійним рівнянням:

$$\frac{dY}{dt} = a(Y, t) + b(Y, t)\theta, Y(t_0) = Y_0, \tag{1}$$

де  $Y$  –  $n$ -мірний вектор стану навігаційної безпеки системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання”;

$a(Y, t)$  –  $n$ -мірний вектор;

$b(Y, t)$  – матриця порядку  $n \times n$ ;

$\theta(t)$  – вектор білого шуму Гаусса з математичним сподіванням  $m(t)$  та матрицею інтенсивностей  $G(t)$ ;

$Y_0$  – вектор початкового стану, із щільністю ймовірності  $f(y_0)$  [13].

На підставі літературних джерел [63, 64] допустимо, що щільність ймовірності розподілу фазових координат  $\omega(y, t)$  системи (3.25) при загальних припущеннях щодо можливості диференціювання функцій  $a(Y, t)$  та  $b(Y, t)$  може бути описана рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова:

$$\frac{\partial \omega(y, t)}{\partial t} = -div \pi(y, t),$$

де  $\pi(y, t)$  – вектор щільності потоку ймовірності [13].

Його складові за позитивними напрямках осей координат дорівнюють:

$$\pi_i(y, t) = A_i(y, t)\omega(y, t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial [B_{ij}(y, t)\omega(y, t)]}{\partial y_i}, \tag{2}$$

де  $A_i$  – коефіцієнт зносу;

$B_{ij}$  – коефіцієнти дифузії, які для рівняння (2) визначаються за формулами:

$$A_i = a_0(y, r) + \frac{1}{2} \sum_{p,q,r=1}^n G_{pq}(t) B_{pq}(y, t) \frac{\partial B_{ir}(y, t)}{\partial y_p} + \sum_{j=1}^n B_{ij}(y, t) m_j(t),$$

$$B_{ij} = \sum_{p,q,r=1}^n G_{pq}(t) B_{iq}(y, t) \partial B_{jq}(y, t).$$

Рівняння (2) необхідно розглядати в якості рівняння збереження імовірності, при цьому кількість імовірності, яка проходить за одиницю часу в позитивному напрямку характеризується потоком  $\pi_i$ .

Виходячи з цього допустимо, що перехід системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” з безпечного навігаційного стану в небезпечне, визначається моментом його перетинання границь сфероїда  $S_q^\delta$ , де відбувається процес поглинання [14]. Дане припущення підтверджується інтегруванням рівняння (2) при дотриманні заданих граничних умов, що впливають із фізичного змісту забезпечення безпечної навігації.

У зв'язку з цим доцільно наділити границю сфероїда  $S_q^\delta$  функцією поглинання  $v^*(y, t)$  [14]. При цьому поглинання станів навігації буксирної системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” описується узагальненим рівнянням Фоккера – Планка – Колмогорова [15]:

$$\frac{\partial \omega^*(y, t)}{\partial t} = -div \pi^*(y, t) - v^*(y, t), \quad (3)$$

де  $\omega^*(y, t)$  – функція щільності ймовірності непоглинутих станів;

$\pi^*(y, t)$  – вектор щільності потоку ймовірності з компонентами:

$$\pi_i^*(y, t) = A_i(y, t) \omega^*(y, t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial [B_{ij}(y, t) \omega^*(y, t)]}{\partial y}.$$

При цьому  $v^*(y, t)$  – щільність поглинання ймовірності (функція поглинання), відповідна події  $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \Sigma$ .

Щільність імовірності визначається умовами поглинання й в області зміни фазових координат характеризується функцією поглинання  $v^*(y, t)$  [13]. Допустимо, що процес поглинання протікає на поверхні сфероїда і його можна описати рівнянням:

$$v^*(y, t) = \delta(a(y) - \gamma(t)) c_1(t) (n^0 \pi(y, t)), \quad (4)$$

де  $a(y) - \gamma(t)$  – параметричне рівняння гіперповерхні сфероїда, який є границею фазової області  $W$ ;

$\delta$  – дельта-функція;

$n^0$  – зовнішня нормаль до поверхні сфероїда  $S_q^\delta$ ;

$c_1(t)$  – коефіцієнт повноти поглинання.

Введення рівнянь поглинання дозволяє знайти рішення (3) для всієї області фазового

простору системи (1) при початковій умові  $\omega^*(y, t) = f(y_0)$  і нульових граничних умовах для  $y_i = \pm\infty (i = 1, \dots, n)$ .

У даному випадку функція  $\omega^*(y, t)$  не є нормованою за рахунок існування ефекту поглинання. Інтеграл від цієї функції по всій поверхні області фазового простору  $W$  дає можливість визначити поточну ймовірність знаходження буксирного системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” в безпечному стані, тобто:

$$P_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^*(y, t) \partial y \leq 1,$$

при цьому для  $t = t_0$  значення  $P_1(t_0) = 1$ . Тоді шукану поточну ймовірність переходу навігаційного процесу буксируємої системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” в небезпечний стан навігації з максимальною кількістю ризиків можна розрахувати за формулою:

$$P_0(t) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \omega^*(y, t) \partial y.$$

Для визначення значення функції  $P_1(t)$  складемо диференційне рівняння її змін. Проінтегрувавши рівняння (3) по нескінченній області існування вектора  $Y$ , отримаємо диференціальне рівняння:

$$P_1^*(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} v^*(y, t) \partial y, \tag{5}$$

оскільки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{div} \pi(y, t) \partial y = 0.$$

Далі, підставивши у праву частину (5) з (4) залежність  $v^*(y, t)$  та нормуючи  $\omega^*(y, t)$ , отримаємо:

$$P_1^*(t) = P_1 c_1 - \int_S (n^0 \pi(y, t)) \partial y, \tag{6}$$

де  $S$  – поверхня заданого сфероїда  $S_q^\delta$ ;

$\pi(y, t)$  – нормалізований вектор потоку ймовірності, який дорівнює  $\pi(y, t) = \frac{\pi^*(y, t)}{P_1(t)}$  і має компоненти:

$$\pi_i(y, t) = A_i(y, t) \omega(y, t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial [B_{ij}(y, t) \omega(y, t)]}{\partial y_i}.$$

Таким чином, для подальших досліджень використовуємо нормовану щільність

імовірності фазових координат, яка дорівнює відношенню виду:

$$\omega(y, t) = \frac{\omega^*(y, t)}{P_1(t)}.$$

Приймаючи, що поглинання реалізацій всередині сфероїда  $S_q^\delta$  для функції поглинання буде пропорційним щільності ймовірності перебування всередині

$$v^*(y, t) = c_2(t)\omega^*(y, t) \quad (7)$$

при  $c_2(t) > 0$ , що враховує інтенсивність поглинання.

Далі, помістивши (7) у праву частину формули (6), отримаємо:

$$P_1^* = -P_1 \int_{S_q^\delta} c_2(t)\omega(y, t) dy. \quad (8)$$

Запишемо отримані залежності (6) та (8) у скороченому вигляді:

$$P_1^* = -P_1\eta(t), \quad (9)$$

а початкову умову зафіксуємо виразом  $P_0(t_0) = 1$ .

Введена до рівняння (7) функція  $\eta(t)$  характеризує поведінку функції поглинання  $v^*(y, t)$  всередині сфероїда й на його поверхні. Для характеристики поглинання станів навігації буксирної системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” на поверхні сфероїда функцію  $\eta(t)$  представимо у вигляді:

$$\eta(t) = \int_S (n^0\pi(y, t))\partial y,$$

а при поглинанні цих же станів всередині сфероїда функцію  $\eta(t)$  перетворимо до вигляду:

$$\eta(t) = \int_{S_q^\delta} (c_2(t)\omega(y, t))\partial y,$$

Для розв’язання рівняння (7) при фіксованій початковій умові  $P_0(t_0 = 0) = 1$  використаємо залежність:

$$P_1(t) = \exp\left[-\int_0^t \eta(\tau)d\tau\right], \quad (10)$$

отже, імовірність переходу буксирної системи “буксирувальник – сейсмічне обладнання” у небезпечний стан за межі поверхні сфероїда  $S_q^\delta$  може бути визначено за формулою:

$$P_0(t) = 1 - \exp \left[ - \int_0^t \eta(\tau) d\tau \right]. \quad (11)$$

Тому, зафіксувавши значення верхньої границі  $P_1(t)$  у формулі (7) або нижньої границі  $P_0(t)$  у формулі (10) і задавшись функцією  $\eta(t)$ , можна визначити часовий інтервал, протягом якого система “буксирувальник – сейсмічне обладнання” буде знаходитись у навігаційній безпеці в границях сфероїда  $S_q^\delta$ , взятого за основу при розробці плану маршруту буксирування. Для рішення завдання щодо забезпечення безпеки навігації буксирної системи “буксирувальник” – “сейсмічне обладнання” за заданими траєкторіями виникає необхідність встановити функцію  $\eta(t)$ , що залежить від нормованої функції імовірності  $\omega(y, t)$ , при цьому:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega(y, t)}{\partial t} &= -\text{div } \pi(y, t) - v(y, t) + \eta(\tau)\omega(y, t), \\ v(y, t) &= \frac{v^*(y, t)}{P_0(t)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Диференціальне рівняння (12), отримане з формули (11) з урахуванням позиції (7), для визначення виду функції  $\eta(\tau)$  необхідно проінтегрувати при заданій початковій умові  $\omega(y, t_0) = f(y_0)$  й нульових граничних умовах на нескінченності.

**Висновки.** Таким чином, удосконалено модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання, яка на відміну від відомих, базується на теорії дифузійних процесів взаємодії активаторних сил середовища та інгібіторних сил на буксирній лінії, що забезпечує навігаційну безпеку буксирної системи з маломорехідним об'єктом, траєкторія якого асимптотично прагне до траєкторії буксирувальника, і дозволяє розрахувати ризики переходу буксируємої системи у небезпечний стан навігації із заданою ймовірністю і визначити часовий інтервал, протягом якого дана система буде знаходитись у навігаційній безпеці при розробці плану маршруту буксирування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Технологія видобування нафти. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ – 2000», 2022. – 308 с.
2. Polydorides, N., Storteig, E., Lionheart, W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35, No 14-15. P. 1429–1438.
3. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник / І. О. Ткаченко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 114 с.
4. Голиков В. А., Мальцев А. С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. *Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА*. 2007. Вып. 13. С. 58-74.
5. Priyadarshini D., Muhammad J., Mauerman L. Utilizing Skills to Improve Behavior Based Safety. *PSJ*. 2020. P. 48–52.
6. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса: Феникс, 2010. 229 с.

7. Мальцев А. С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. 2006. Вып. 11. С. 74–86.
8. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений в условиях неопределенности в задачах безопасности мореплавания. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. 2006. Вып. 11. С. 91–107.
9. Піпченко О. Д. Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 – річковий та морський транспорт). – Національний університет "Одеська морська академія", м. Одеса, 2021.
10. Пипченко А. Д. Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна. Вестник Одесского национального морского университета. 2017. Вып. 2(51). С. 156–164.
11. An M., Wang J., Ruxton T. The development of fuzzy linguistic risk level for analysis of offshore engineering products using approximate reasoning approach. Proceedings of OMAE 2000, the 19th International Conference of offshore mechanics and Arctic Engineering. New Orleans, USA, 2000. P. 321–329.
12. Fossen T. I. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. Norwegian University of Science and Technology, 2005. 28 p.
13. Lataire E., Vantorre M., Delefortrie G. The Influence of the Ship's Speed and Distance to an Arbitrarily Shaped Bank on Bank Effects. 2015. Vol. 11: Prof. Robert F. Beck Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics. DOI: 10.1115/omae2015-41835
14. Антомонов, Ю. Г. Расчёт систем, оптимальных по быстродействию: (Управление судном по курсу) / Ю.Г. Антомонов. – Л. :Судостроение, 1964. – 71 с
15. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

УДК 656.61 (656.62)

doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.17

*Зазірний А.А.*

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ МІСЦЯ ПОЛОЖЕННЯ СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

*Мета даного дослідження полягає в опрацюванні можливостей підвищення елементів безпеки плавання судна за недостатньої навігаційної інформації за допомогою нечітких логічних систем. Для цього необхідно дослідити методи контролю розташування судна на основі нечіткої логіки, розробка нового підходу до визначення параметрів вектора стану судна, контролю розташування за допомогою способів теорії нечітких множин; в оцінці параметрів вектора стану судна, що входять до системи з різних джерел. У роботі запропоновано спосіб оцінки за допомогою нечітких чисел. Зазначений спосіб дозволяє оцінювати одночасно декілька параметрів вектора стану судна, а також візуалізувати небезпечні та безпечні параметри.*