

**KAPITEL 6 / CHAPTER 6⁶****METHODS AND MODEL OF RISKS ASSESSMENT IN INFLUSION OF HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS DURING TOWING OF SEISMIC OPERATIONS AND RISKS ASSESSMENT IN MANEUVERING TOWING OPERATIONS****DOI: 10.30890/2709-2313.2024-30-00-022****Вступ**

Аналіз відомих досліджень [1, 2, 3] доводить, що буксирувальна операція пов'язана з множиною ризиків, одним із яких є ризик маневрування. Слід зазначити, що при буксируванні судно стає нестійким на курсі, хоч і зберігає функцію управління.

Якщо буксирувальна лінія закладена у кормовий клюз, її характеристики змінюються. Як наслідок, буксирувальник стає більш стійким на курсі, здатним слідувати запланованому напрямку, проте спостерігається зниження керованості судном. До того ж на керованість буксирувальника безпосередньо впливає й вага об'єкту буксирування. Чим більшою є вага об'єкту, який буксирується, тим більшим є вплив на стійкість буксирувальника. Непоодинокими є випадки втрати керованості буксирувальників через недооціненість вищенаведених факторів.

Маневреність буксирувальника у більшій мірі залежить від довжини буксирувальної лінії. Чим коротшою є буксирувальна лінія, тим меншою є маневреність судна. Такий вплив довжини буксирувальної лінії на маневреність буксирувальника пояснюється тим, що при повороті судно розвертається навколо центру ваги, під впливом дії керуючих гвинтів корма рухається вбік протилежний повороту. Це змінює напрямок діючого буксировочного зусилля, яке перешкоджає повороту судна. Корма буксирувальника відхиляється доти, доки похідна різниці буксировочної сили й сили на буксирувальній лінії не буде дорівнювати силі на керуючих гвинтах, що слід враховувати при здійсненні маневру. Швидкість такого маневру пропорційна довжині буксирувальної лінії. Для підвищення маневреності буксирувальника буксирувальна лінія має бути викладена з кормового клюза.

⁶*Authors: Postnikov Yevgen*



Слід зазначити, що термін «довга буксирвальна лінія» є некоректним, оскільки довжина буксированої лінії залежить від потужності буксирвальника. При буксированні важких об'єктів можливі ситуації втрати буксирвальником управління. У такому випадку застосовують спосіб бічного буксировання, проте такий спосіб є неприйнятним для буксировання сейсмічного обладнання.

Як правило, сейсмічне обладнання буксирують так званним буксированням на лінії. У такому випадку сейсмічне обладнання має бути закріплене так, щоб воно постійно утримувалось у кільватері буксирвальника. На таке положення впливають крен і диферент сейсмічного обладнання та місце кріплення троса на ньому.

Кращим кріпленням сейсмічного обладнання є таке положення, при якому сейсмічні коси утримуються в кільватері буксирвальника самостійно. На практиці оптимальним кріпленням сейсмічного обладнання є таке, що забезпечує відсутність крену й наявність невеликого диференту на корму. У такому випадку забезпечується стійкість маневрування сейсмічним обладнанням та буксирвальником.

При кріпленні на рівний кіль об'єкт, що буксирується, потребує постійного корегування в кільватері. До того ж виникають ризики повної втрати управління; у такому випадку об'єкт, що буксирується, виводиться з кільватера й здійснює рух осторонь. Такий маневр можливий при повороті керма управління на декілька градусів вбік, що призводить до створення додаткового буксирвального опору, особливо якщо буксирвальна лінія закладена в кормовий клюз буксирвальника.

Якщо об'єкт, що буксирується, має диферент на ніс, то його вплив у кільватері буксирвальника є мінімальним. Такий об'єкт, як правило, відхиляється з головного курсу буксировання, створюючи сильні ривки буксирвальної лінії та має низьку піддатливість маневрам буксирвальника. Такий спосіб буксировання у більшості випадків є вимушеним, оскільки потребує обережності при маневруванні, набору швидкості та є надскладним у складних погодних умовах.



З точки зору маневреності, найкращим місцем кріплення буксирного троса на об'єкті, що буксирується, є носовий край. Трос, що закріплений за кнехти, бітенги або інші обладнання, пропускається через носовий клюз. Можливе кріплення буксирного тросу й за якірні клюзи. Кріплення буксирного тросу на носовому краю сприяє його утриманню в кільватері буксирного троса. Віддалення точки кріплення троса від носового краю призводить до погіршення стійкості на курсі, а віддалення буксирного троса на відстань чверті довжини судна призводить до втрати управління. Для подолання такого недоліку застосовується додаткова диферентовка на кормі об'єкта, що буксирується.

На маневреність буксування маломірних об'єктів безпосередньо впливає якість буксирної лінії. Як правило, використовують троси із синтетичної тканини, яка є достатньо міцною, еластичною, компенсує смикання при буксуванні та не створює провисання.

Під час виконання морської буксирної операції під впливом несприятливих погодних умов можлива зміна довжини буксирної лінії, яка має бути закладена в буксирний клюз. Такі дії обумовлені безпекою команди та запобігають перевертанню буксирного троса при хитах.

При буксуванні важких об'єктів при низькій швидкості довжина буксирної лінії не змінюється, а перебування команди на палубі обмежується.

При буксуванні декількох об'єктів одночасно використовують дві схеми об'єднання у склад суден.

При першому варіанті буксирний трос з'єднується з кожним об'єктом окремою буксирною лінією різної довжини. Довжина буксирної лінії повинна бути достатньою та створювати провис, щоб забезпечити буксирній лінії першого об'єкта перебування над нею. Довжина коротшої буксирної лінії повинна відповідати умовам та правилам безпеки буксування. Така схема є економічно вигідною, оскільки швидкість складу суден – двох об'єктів, що буксуються, та буксирного троса знижується лише



на 10-15% порівняно із буксируванням одного об'єкта. Проте недоліком такої схеми є низька маневреність буксирувальника у випадку обриву хоча б одного буксирувального тросу.

Другий варіант буксирування передбачає послідовне з'єднання буксирувальника та об'єктів буксирування. Отже, буксирувальна лінія подовжується, що призводить до ускладнень при маневруванні та управлінні на мілководді. Така схема реалізується за сприятливих погодних умов, як наслідок, у морі чи океані застосовується вкрай рідко.

При буксируванні такі об'єкти є малокерованими, важко втримуються в кільватерному струмені буксирувальника, відхиляються від курсу. Для втримання на курсі малорозмірних об'єктів використовують спосіб розподілу тяги буксирувальника за допомогою біфілярного кріплення буксирної лінії. Відповідно до такого способу, на передніх кутах об'єкта, що буксирується, симетрично кріпляться рівні за довжиною троси, довжина яких має бути не менша відстані між точками кріплення. Проте, чим довшими є троси, тим стійкішим є об'єкт. Вільні кінці тросів поєднуються у буксирувальну лінію. При виході об'єкта, що буксирується, із кільватера відбувається зниження навантаження на внутрішній трос й збільшується на зовнішній, що призводить до відновлення позиції об'єкта в кільватері.

При буксируванні маломорехідних об'єктів, наприклад сейсмичного обладнання або платформи, об'єкт має завжди переміщатися по зовнішній кромці кільватерного струменя.

Слід зазначити, що маневри виконує тільки головний буксирувальник. Неузгодженість дій буксирувальників може призвести до аварії та втрати всього складу суден.

Таким чином, маневрування є найбільш складним елементом при проведенні буксирувальної операції сейсмичного обладнання. При виконанні даного елемента існує ризик виникнення складної навігаційної ситуації, що вимагає побудови системи управління ризиками та розроблення методу зниження ризику маневрування при проведенні буксирувальної операції



маломорехідного об'єкту на прикладі сейсмічного обладнання.

6.1. Метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні

Під час сейсмічної розвідки має проводитись постійний контроль сейсмічного обладнання та його поведінки в морі. Контроль, зазвичай, здійснюється технічними засобами об'єктивного контролю та візуально, особливо під час хитавиці. Перевірка стану буксирувальної лінії та положення сейсмічного обладнання проводиться систематично на розсуд судноводія. Також при підготовці до виходу в море проводиться технічне обслуговування буксирувального троса, змащувальні процедури в місцях кріплення, роллів і клюзів, здійснюється перевірка справності сейсмічного обладнання.

Перед початком буксирування сейсмічного обладнання дані його технічного стану відображаються у журналі буксирування. Під час сейсмічної розвідки у темний час доби або в умовах обмеженої видимості склад суден повинен вживати дії для попередження надмірного зближення з іншими суднами.

При погіршенні погодних умов під час сейсмічної розвідки судноводій буксирувальника має виконати низку дій для забезпечення безпеки складу суден:

- зниження швидкості буксирування;
- зменшення/збільшення довжини буксирувального тросу;
- вибір безпечного для складу суден курсових кутів за вітром та рівнем хитавиці;
- посилення спостереження за станом сейсмічного обладнання;
- згортання сейсмічного обладнання.

По закінченню сейсмічної розвідки керівник оформлює відповідні документи, в яких фіксується час початку та завершення буксирування, маршрут, події, що виникли під час розвідки. Дані сейсмічної розвідки оброблюються та узагальнюються.



Варіантом вирішення проблемних (аварійних) ситуацій у відносно стабільних структурах управління, до яких належить операція буксирування сейсмічного обладнання, є метод усереднення. Він використовується при дослідженні процесу функціонування структури організаційно-технічної системи, відповідальної за буксирування сейсмічного обладнання. Проте, складності використання методу виникають при практичній реалізації у випадку, коли наближення справедливо не для часового відрізка $[0; 1/\varepsilon]$, де $\varepsilon > 0$ – малий параметр, а для значно меншого часового інтервалу. При цьому не виконуються умови, які дозволяють виконати тільки перше наближення.

Одержимо наближення для часового проміжку $[0; 1/\varepsilon]$ методом стандартного усереднення. Стан системи управління безпекою судна, як система диференціальних рівнянь першого порядку, записаний у стандартному вигляді (1.1):

$$dx/dt = \varepsilon X(x, t, \varepsilon), \text{ де } x \in R^r, \varepsilon \in (0, \varepsilon], t \in [0, \infty). \tag{1.1}$$

Нехай функція $X(x, t, \varepsilon)$ рівномірно обмежена при $x = 0$. Тоді виконується умова Липшица за аргументом x :

$$|X(x_1, t, \varepsilon) - X(x_2, t, \varepsilon)| \leq M_{|x_1 - x_2|}, \text{ де } M = const, x_1, x_2 \in R^r.$$

У такому випадку кожна із задач Коші $x(0) = x_0$ для рівняння (1.1) буде мати тільки одне нелокально-продовжене рішення у формі $x(t, x_0, \varepsilon)$.

Рішенням правої частини усередненого рівняння (1.1) буде формула (1.2):

$$Z(x, \varepsilon) = (1/T)\varepsilon \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(x, t, 0)dt, \tag{1.2}$$

при функції $X(x, t, \varepsilon)$, що допускає усереднення як обов'язкову умову, і коли функція $\sigma(\varepsilon)$ така, що $\sigma(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $(\varepsilon) \rightarrow 0$ для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$ буде виконуватися умова (1.3):

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left| \varphi(x) - (\varepsilon/\sigma(\varepsilon)) \int_0^{\sigma(\varepsilon)/\varepsilon} X(x, t + s, \varepsilon)ds \right| = 0, \tag{1.3}$$

$$x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon.$$

У випадку виконання сформульованої умови межа виразу (1.2) може



виявитися неіснуючою або бути відмінною від функції $\varphi(x)$.

При використанні звичайного методу усереднення достатньо виконання умови для кожної з обмежених областей (1.4):

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} |X(x, t, \varepsilon) - X(x, t, 0)| = 0, x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon. \quad (1.4)$$

Допущення (1.4) свідчить про необхідність застосування звичайного методу усереднення. Якщо для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$ виконується умова (1.4), тоді межа (1.3) існує тільки у випадку, якщо функція $X(x, t, \varepsilon)$ допускає усереднення. Тоді

$$\lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_0^T X(x, t, 0) dt = \varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt,$$

і умова (1.3) виконується для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$ і будь-якої функції $\sigma(\varepsilon) = \varepsilon^\alpha$, де $\alpha < 1$.

Розширити можливості методу усереднення можливо, якщо припустити, що функція $X(x, t, \varepsilon)$ допускає усереднення й існує межа

$$\varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt,$$

а функція $\varphi(x)$ з постійної M буде задовольняти умові Липшица. Тоді задача Коші (1.5):

$$dx'/dt = \varepsilon \varphi(x'), x'(0) = x_0 \quad (1.5)$$

має тільки одне рішення $x'(t, x_0, \varepsilon)$.

Для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$ та для будь-якого $\sigma > 0$ можна знайти таке число $\varepsilon_1 > 0$, при якому зі співвідношень $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_1$ і $x_0 \in Q$, враховуючи умову (3.3), одержимо нерівність

$$\max |x'(t, x_0, \varepsilon) - x(t, x_0, \varepsilon)| < \sigma; \quad 0 \leq t \leq 1/\varepsilon.$$

Нерівність підтверджує факт, що за умови (1.3) функція $X(x, t, \varepsilon)$ приймає усереднене значення за проміжок часу приблизно $\sigma(\varepsilon)/\varepsilon$.

У цей же період часу $x(t, x_0, \varepsilon)$ зміниться на значення порядку $\sigma(\varepsilon)$. Отже, траєкторія $x(t, x_0, \varepsilon)$ у системи (1.1) виявиться подібною до траєкторії $x'(t, x_0, \varepsilon)$ усередненої системи (1.5). На цій підставі слід вважати, що представлений спосіб



методу усереднення буде застосований для більш широких допущень, і дозволить визначати відповідне приближення, поряд зі звичайним методом усереднення.

Процес управління ризиком у структурах, що забезпечують безпеку буксирування сейсмічного обладнання, має всебічно розглядати різні аспекти операції буксирування, пов'язані з ризиком, що передбачає визначення й аналіз ризику, оцінку помірному ризику із розрахунком можливості його зниження, застосовуючи контроль керуючих дій.

Визначення потенційних небезпек, їх аналіз та визначення відповідних ризиків є структурованим процесом, завдання якого полягає у визначенні ступеню ймовірності виникнення події та розміру ймовірних збитків та втрат від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання. Наслідками несприятливих подій слід вважати міру завдання шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу. При здійсненні аналізу можливого ризику необхідно провести аналіз його похідних та наслідків:

- ідентифікація небезпеки, що полягає у визначенні причини реструктуризації системи;
- ймовірність виникнення небезпечної ситуації та частота її виникнення;
- втрати та збитки тієї чи іншої небезпечної ситуації, оцінка наслідків.

Для визначення ймовірності події застосовується індикаторна функція (1.6):

$$f(x) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma, \\ 0, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma. \end{cases} \quad (1.6)$$

Тоді вираз

$$\left[\int_0^t f(x) dt \right] / m$$

визначає частку в результаті розподілу кількості станів $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$ (одиниць) на загальну кількість m станів спостережень організаційно-технічної структури безпеки (одиниць і нулів).



У такому випадку рівність дає можливість визначити ймовірність (середню частоту) структурної стійкості організаційно-технічної структури, відповідальної за безпечне буксирування сейсмічного обладнання:

$$f^*(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\left[\int_0^t f(x) dt \right] / m \right].$$

Нехай для будь-якої множини X функція $f^*(x)$ дорівнює постійній величині. Тоді, з урахуванням співвідношення:

$$\int_X f^*(x) dm = \int_X f(x) dm$$

одержимо таку рівність:

$$1/m \sum_{k=1}^m f(x) = m(x)/m(X) = \text{const} = p.$$

Отже, ймовірність стійкості організаційно-технічної структури, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу визначена за допомогою значення p в межах теореми Боголюбова. У такому випадку часовій послідовності змін (1.1) структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання притаманна властивість ергодичності.

Аналогічно до гіпотези повної ймовірності складної події виду (1.6), отримаємо значення ймовірності p_0 подій $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma$, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові безпечної експлуатації, а, отже, і навігаційної безпеки.

Запропонований метод усереднення дозволяє знаходити необхідне відповідне наближення для оцінки ймовірності стійкості структури організаційно-технічної системи управління навігаційним станом складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання в межах розширених припущень. Для підтримання стану структурної стійкості достатнім є привести до мінімуму величину p_0 , оскільки область реалізації послідовності структурних переходів



містить дві точки щільності. Ресурс буксирувальника та сейсмічного обладнання дозволяє забезпечити підтримку стійкості структури в системі управління станом навігації складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання.

Таким чином, удосконалено метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу, в якому на відміну від відомих, ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції, що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

6.2. Метод визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування

Оскільки визначення траєкторії руху сейсмічного обладнання при швидкому маневрі відносно головного курсу є складною багатомірною задачею, то доцільним є застосування аналітичного методу. Аналітичний метод дозволить дослідити динаміку сейсмічного обладнання, враховуючи низку допущень та обмежень.

У математичній постановці задачі рух складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання замінено характерними точками, які описують їх рух. Характерними точками буксирувальника є точка з'єднання із буксирувальним тросом. Характерною точкою сейсмічного обладнання є точка кріплення до буксирувальної лінії. Умовна пряма, що з'єднує характерні точки



буксирувальника та сейсмічного обладнання, є базою буксирування.

Як відомо, динаміка системи складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання із врахуванням усіх впливаючих дій та прискорень є складним завданням гідродинаміки. Враховуючи схематизацію завдання, яке дозволить її спростити, виникає математична модель, що складається із системи нелінійних диференціальних рівнянь зі звичайними або частковими похідними. Як наслідок, заміщення руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки дає можливість уникнути розгляду низки надлишкових ускладнюючих обставин, проте принципово не вплине на результат розв'язання задачі.

Нехай одним із обмежень буде таке. Крива провисання буксирувальної лінії не враховується, а зміна курсу буксирувальника є незначною. Математичну модель за визначеним обмеженням можна записати як систему диференціальних рівнянь зі збереженням усіх членів не вище першого порядку. Враховуючи математичну модель, при зміні курсу буксирувальника траєкторію сейсмічного обладнання слід розглядати як плоску криву. У результаті дослідження динаміки складу суден буксирувальника і сейсмічного обладнання отримаємо дані щодо руху сейсмічного обладнання при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника. Отримані дані є основою навігаційної безпеки при плануванні та виконанні завдань сейсмічної розвідки.

Нехай вага сейсмічного обладнання дорівнює m , а рух характерної точки сейсмічного обладнання B за умови довільного руху характерної точки буксирувальника A , тоді її вектор визначається як $r_A = r_A(t)$. Опис руху характерних точок буксирувальника та сейсмічного обладнання слід представити у вигляді диференціальних рівнянь.

Проведемо запис векторної рівності у скалярній формі: $x_A = x_A(t)$, $y_A = y_A(t)$. Таким чином, слід вважати, що характерна точка сейсмічного обладнання рухається під впливом двох сил:

– сила буксирувальної лінії F , що відображає реакцію буксирувальної лінії між характерними точками A та B , та прийнята як не значна;



– векторна сила опору руху R .

Векторна сила опору руху R визначається як

$$R = \psi(v) (v^*/v),$$

де v^* – вектор швидкості характерної точки B за модулем v ;

$\psi(v)$ – функція швидкості характерної точки A .

Враховуючи векторну рівність $r_B = r_A - AB$, отримаємо залежність для координат характерних точок (2.1):

$$x_B = x_A - L \cos \varphi, y_B = y_A - L \sin \varphi, \quad (2.1)$$

де L – буксирувальна лінія.

Диференціальні рівняння руху характерної точки сейсмічного обладнання B слід описати виразами (2.2) та (2.3):

$$m d^2 x_B / dt^2 = F \cos \varphi - R_x; \quad (2.2)$$

$$m d^2 y_B / dt^2 = F \sin \varphi - R_y, \quad (2.3)$$

де $m d^2 x_B / dt^2, m d^2 y_B / dt^2$ – похідні часу.

До рівняння (2.2) підставимо результуюче значення виразу (2.3) та отримаємо модуль вектора F . Результатом підстановки буде формула (2.4):

$$m d^2 y_B / dt^2 = (m d^2 x_B / dt^2 + R_x) (\sin \varphi / \cos \varphi) - R_y. \quad (2.4)$$

При наступному диференціюванні виразів (2.2) та (2.3) та підстановки отриманих значень до виразу (2.4) отримаємо (2.5):

$$\begin{aligned} m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - a d\varphi^2 / dt^2) = \\ = -(\psi(v)/v)(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - a d\varphi / dt), \end{aligned} \quad (2.5)$$

де $a = \text{const}$.

У результаті розв'язання диференціального рівняння (2.5) відносно φ , при підстановці результату виразу (2.1) отримаємо закон руху характерної точки сейсмічного обладнання B у залежності від часу. Якщо далі традиційно припустити, що опір середовища є пропорційним квадрату швидкості буксирувальника

$$\psi(v) = \lambda v^2,$$

то при диференціюванні виразу (2.5) отримаємо (2.6):



$$\begin{aligned}
 m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - ad\varphi^2 / dt^2) = \\
 = -\lambda v(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - ad\varphi / dt).
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Розглянемо два окремі випадки.

Перший випадок. Нехай буксирувальник рухається по запланованому маршруті без маневрування. У такому випадку траєкторія руху характерної точки A буксирувальника є прямою лінією. Якщо $x_A = vt$, то при $y_A = 0$ при диференціюванні виразу (2.6) отримуємо (2.7):

$$\begin{aligned}
 & (m/\lambda L)ad\varphi^2 / dt^2 \\
 & + ((v/L) \sin \varphi + d\varphi / dt) \times \\
 & \times \left[(v^2 / L^2) \cos^2 \varphi + ((v/L) \sin \varphi + (d\varphi / dt))^2 \right]^{1/2} = 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Другий випадок. Нехай траєкторія руху характерної точки буксирувальника A є циркуляцією радіусів $D/2 = R_C$. У такому випадку:

$$x_A = R_C \cos(vt/R_C), y_A = R_C \sin(vt/R_C).$$

При диференціюванні виразу (2.7) отримуємо (2.8):

$$\begin{aligned}
 & (m/\lambda L)ad\varphi^2 / dt^2 = \\
 & = (mv^2 / \lambda LR_C^2) \sin(vt/R_C - \varphi) \\
 & + [v \cos(vt/R_C - \varphi) - Ld\varphi / dt] \times \\
 & \times [(v/L)^2 \sin^2(vt/R_C - \varphi) \\
 & + (v/L) \cos(vt/R_C - \varphi) + (d\varphi / dt)]^{1/2}.
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Результати модельних випробувань наведені на рисунках 2.1 та 2.2.

Аналіз отриманих даних свідчить, що при натягу буксирувальної лінії в розглянутому діапазоні і швидкості руху складу суден буксирувальника та маломорехідного обладнання, враховуючи гідродинамічні особливості маломорехідного об'єкта, доцільно вважати, що $\Psi(v) = \lambda v^n$, де $n \rightarrow 1$. У такому випадку отримуємо лінійну залежність опору зовнішнього середовища відповідно швидкості буксирування $\Psi(v) = \lambda v$. Визначена залежність наведена на рисунку 2.3.

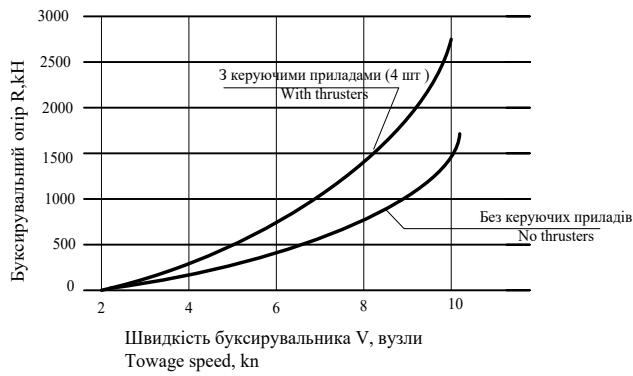


Рисунок 2.1– Залежність буксирувального опору маломорехідного об’єкту відносно швидкості буксирування без врахування хитавиці
Джерело: розроблено автором



Рисунок 2.2 – Залежність буксирувального опору маломорехідного об’єкту від швидкості буксирування з урахуванням хитавиці
Джерело: розроблено автором

З рисунку 2.3 очевидно, що вектор швидкості маломорехідного об’єкта співпадає з напрямком тяги буксирувальника, як наслідок диференційні рівняння 2.7 та 2.8 доцільно замінити виразом:

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [(v/L) \sin \varphi + d\varphi/dt]L = 0$$

або

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [d\varphi/dt - (mv^2/\lambda L) \sin (\beta + \varphi - vt/R_c)/R_c \cos \beta] = 0.$$

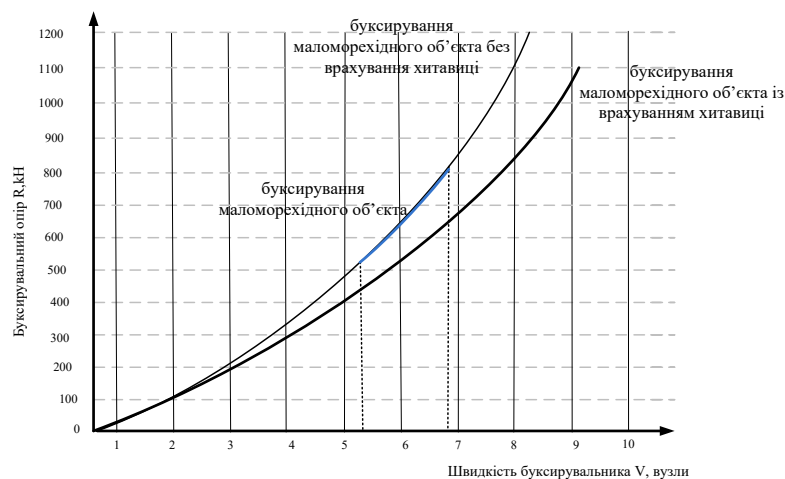


Рисунок 2.3– Узагальнений аналіз залежності буксирувального опору від швидкості буксирування

Джерело: розроблено автором



При буксированні маломорехідних об'єктів величину $m/\lambda L$ слід вважати малим параметром. При допущенні, що $m/\lambda L \rightarrow 0$ отримаємо диференціальне рівняння плоскої кривої, яка описує рух маломорехідного об'єкта при компенсуванні розхитування буксирувальника, яка є трактрисою прямої лінії (2.9):

$$d\varphi/dt + (v/L) \sin \varphi = 0. \tag{2.9}$$

Як наслідок, якщо виконується морське буксування для подій виду $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$ або $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma$, для опису траєкторії маломорехідного об'єкта слід використовувати аналітичний опис трактриси прямої лінії (рисунок 2.4).

Розглядаючи рисунок 2.4, справедливо відмітити, що між кутом φ та курсовим кутом існує залежність $q_B = \pi - \varphi$. Тому, як наслідок, маємо співвідношення $q_B/dt = -d\varphi/dt$. Рівняння (2.9) слід записати як (2.10):

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \tag{2.10}$$

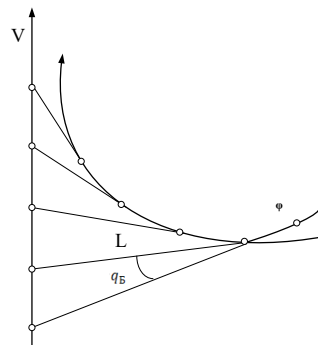


Рисунок 2.4 –Опис траєкторії сейсмічного обладнання

Джерело: розроблено автором

У результаті інтегрування залежності (2.10) отримаємо:

$$L(q_B - q_{B0}) = \int_0^t v \sin q_B dt,$$

де q_B – кут між напрямком маломорехідного об'єкта у початковий момент часу та діаметральною площиною буксирувальника після повороту судна;

$q_{B0} = \pi - \Delta K$, де ΔK – величина зміни курсу буксирувальника.



Як наслідок, вираз траєкторії для сейсмичного обладнання отримаємо з формули (2.10):

$$dq_B / \sin q_B = (v/L) dt.$$

Провівши його інтегрування, маємо:

$$\int_{q_{B0}}^{q_B} dq_B / \sin q_B = (v/L) \int_0^t dt.$$

Звідки

$$\ln \left[\frac{tg(q_B/2)}{tg(q_{B0}/2)} \right] = vt/L$$

або

$$tg(q_B/2) = (ctg(\Delta K/2)) \exp S/L, \quad (2.11)$$

де S – рух буксирувальника після маневру.

Формула (2.11) є рівнянням трактиси прямої лінії, а отже при повороті буксирувальника на кут q_B кут буксирувальника поступово зміщується до 180° , як наслідок, траєкторія руху маломорехідного об'єкта стає подібною до траєкторії буксирувальника. Слід вважати, що траєкторія руху маломорехідного об'єкта є асимптотою.

Як наслідок, отримаємо математичні залежності при апроксимації траєкторії руху маломорехідного об'єкта за умови: $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$, що необхідно для рішення завдань забезпечення безпеки навігації при плануванні операцій з буксування.

Диференційне рівняння (2.10) можна отримати через послідовність геометричних операцій, розглянувши траєкторію руху маломорехідного об'єкта. Нехай зміна курсу буксирувальника (поворот) відбулася миттєво, а подальший рух є прямолінійним та непротяжним. За умови, що в деякий момент часу база буксирувальника L формує своєю траєкторією кут q_B , відновимо перпендикуляр до напрямку характерних точок складу суден, буксирувальника – A та маломорехідного об'єкту – B , отримаємо центр повороту на прямій (точка C). Отже величина миттєвої кутової швидкості прямої AB визначається як $dq_B/dt = v/AC$. Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту



точки C наведено на рисунку 2.5.

Зважаючи, що $AC = L/\sin q_B$, отримаємо (2.12)

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \quad (2.12)$$

Очевидно, що формули (2.11) та (2.13) тотожні.

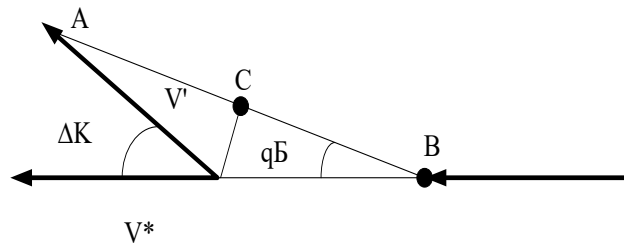


Рисунок 2.5 – Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту точки C при маневруванні

Джерело: розроблено автором

Слід зазначити, що графічно можна відобразити траєкторію руху маломорехідного об'єкта, в тому числі при маневруванні.

Розглянемо випадок зміни курсу буксирувальника, коли кут буксирувальника змінено відносно первісного курсу на $\Delta K = \pi - q_{B0}$. Як наслідок, буксирувальник рухається за новим курсом. L – відстань по горизонталі між буксирувальником і маломорехідним об'єктом.

Для побудові траєкторії руху маломорехідного об'єкта необхідно виконати процедуру, яка складатиметься з таких послідовних етапів:

- 1) визначення та відбір на лінії нового курсу буксирувальника набору точок n , розташованих рівномірно на малій відстані одна від одної;
- 2) з'єднання цих n точок прямою лінією;
- 3) відкладання відрізка a , рівного довжині L ;
- 4) з'єднання точок з прямою лінією та відкладання відрізка b , до дорівнює довжині L .

Аналогічно для точок $в$, $г$ та ін.

З'єднання точок $а$, $б$, $в$ та інших дозволить сформувати траєкторію руху маломорехідного об'єкта – трактрису прямої лінії (рисунок 2.6).



Але графічний метод побудови траєкторії маломорехідного об'єкта не дозволяє визначити загальні закономірності його руху залежно від головного курсу буксирувальника. А отже, виникає необхідність визначення руху буксирувальника у параметричному вигляді для визначення загальних закономірностей руху маломорехідного об'єкта.

Розглянемо рисунок в обрисі прямокутної системи координат. Траєкторія маломорехідного об'єкта є кривою другого порядку, де L – довжина дотичної, та має постійне значення, а диференціальне рівняння матиме вигляд:

$$y^2 + AB^2 = L^2,$$

де $y = L \sin q_B$.

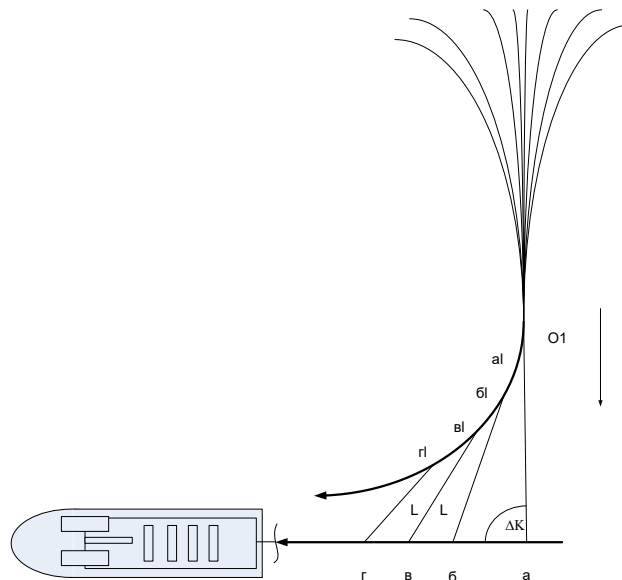


Рисунок 2.6 – Траєкторія руху маломорехідного об'єкта при зміні курсу ΔK на 90 градусів вправо

Джерело: розроблено автором

Розрахунок довжини дотичної здійснюється за виразом:

$$AB = \frac{ydy}{dx}.$$

Тоді

$$L^2 \sin^2 q_B + L^2 \sin^2 q_B (dx/dy)^2 = L^2$$

і, отже,

$$dx = ctg q_B dy.$$



Підставляючи у цей вираз значення $dy = L \cos q_B \cdot dq_B$, одержимо

$$dx = L(\cos^2 q_B / \sin q_B) dq_B,$$

а після інтегрування цього виразу остаточно знайдемо

$$x = L \ln \operatorname{tg}(q_B/2) + L \cos q_B + C.$$

Таким чином, параметричні рівняння трактриси прямої лінії можуть бути представлені таким чином:

$$x = L \ln \operatorname{tg}(q_B/2) + L \cos q_B;$$

$$y = L \sin q_B.$$

З параметричних рівнянь трактриси очевидно, що параметр q_B змінюється в інтервалі: $0 < q_B < \pi$:

$$q_B \rightarrow \begin{cases} 0, & \text{при } x \rightarrow -\infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi, & \text{при } x \rightarrow \infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi/2, & \text{при } x \rightarrow 0 \text{ і } y \rightarrow L. \end{cases}$$

Враховуючи отриману залежність, справедливим є твердження, що вісь абсцис є асимптотою трактриси. Для всіх значень q_B та $(\pi - q_B)$ мають однакові значення y , а значення x відрізняються лише знаком, оскільки трактриси симетрична осі ординат. Як наслідок, при симетричному русанні буксирувальника маломорехідний об'єкт має симетрично відхилятися від курсу буксирувальника.

Розглянемо інші властивості трактриси прямої лінії:

1. Визначення радіуса кривизни у довільній точці трактриси:

Радіус кривизни дорівнює $R_K = dS/dq_B$, де

$$dS^2 = dx^2 + dy^2 = L^2(\cos^4 q_B / \sin^2 q_B) d^2 q_B + L^2 \cos^2 q_B d^2 q_B = L^2 \operatorname{ctg}^2 q_B d^2 q_B.$$

Звідси отримаємо вираз (2.13):

$$dS = L \operatorname{ctg} q_B dq_B. \quad (2.13)$$

Радіус кривизни в довільній точці трактриси можна записати так (2.14):

$$R_K = L \operatorname{ctg} q_B. \quad (2.14)$$

Подальшим кроком є визначення координат центру кривизни трактриси, використовуючи радіус кривизни. Графічно для довільної точки трактриси визначаємо координати.



Покрокове визначення координат центру кривизни трактриси складається у такому:

- нанесення із точки A на осі абсцис відмітки на траєкторії руху маломорехідного об'єкта в точці M із радіусом $L = AM$;
- порівняння лінії перетину з перпендикуляром AN у точці N .

Оскільки $MN = L \operatorname{ctg} q_B$, то точка N є центром кривизни трактриси.

Аналогічно визначимо координати центру кривизни, спираючись на рисунок 2.7:

$$x_K = x - L \cos q_B = L \ln \operatorname{tg} q_B;$$

$$y_K = L \operatorname{cosec} q_B.$$

Визначимо еволюту трактриси, використовуючи вираз для координат центру кривизни. Якщо кут q_B розглядати як параметр, то можна отримати параметричне рівняння еволюти трактриси. Виключаючи із цих виразів параметр q_B , знайдемо:

$$y_e = (L/2)(\exp(x/L) + \exp(-x/L)) = L \operatorname{ch}(x/L).$$

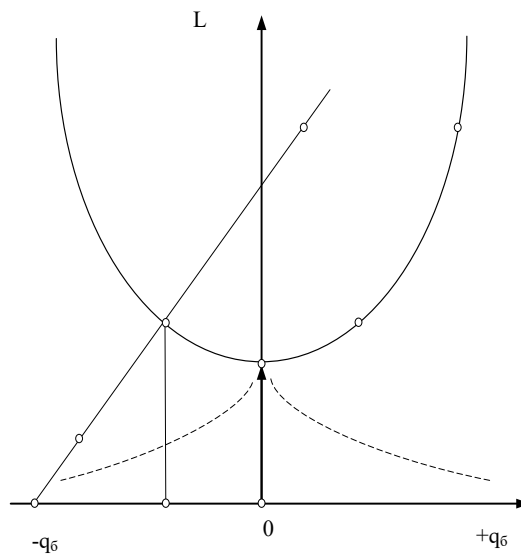


Рисунок 2.7 – Евольвента ланцюгової лінії, де L – довжина буксирної лінії, [м]; $-q_B, +q_B$ – курсові кути на буксируємих об'єкт

Джерело: розроблено автором

З аналізу виразу слідує, що еволютою трактриси є ланцюгова лінія. Як наслідок, трактриса є евольвеною ланцюгової лінії (рисунок 2.7).



Довжина дуги трактриси, відкладена відносно точки $M_0(0, L)$ відповідної до довільного значення q_B , дорівнює величині (2.13), тобто (2.15)

$$S = \int_{x/2}^{q_B} L \operatorname{ctg} q_B dq_B = -L \ln \sin q_B. \quad (2.15)$$

Натуральне рівняння трактриси b можна одержати, якщо усунути із виразів (2.14) і (2.15) параметр q_B :

$$R = L(\exp(2S/L) - 1)^{1/2}.$$

Розглянемо кінематичні властивості трактриси прямої лінії.

Нехай точка A рухається вздовж прямої з постійним вектором швидкості V .

Визначимо параметричні рівняння руху точки B :

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos(\pi - q_B), \\ y_B &= L \sin q_B \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Якщо $x_A = vt$, де t – час, то система рівнянь (2.16) матиме вигляд (2.17)

$$\begin{aligned} x_B &= vt - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Для початкових умов $x = 0$, $q_B = \pi/2$ рівняння трактриси у параметричній формі доцільно записати як:

$$\begin{aligned} x_B &= L \ln \operatorname{tg}(q_B/2) + L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned}$$

Підставляючи дві останні системи рівностей, одержимо

$$vt = L \ln \operatorname{tg}(q_B/2)$$

або

$$\operatorname{tg}(q_B/2) = \exp(vt/L).$$

Використовуючи відомі тригонометричні формули, опишемо $\sin q_B$ і $\cos q_B$:

$$\begin{aligned} \sin q_B &= (2 \exp vt/L)(1 + \exp 2vt/L), \\ \cos q_B &= (1 - \exp 2vt/L)(1 + \exp 2vt/L). \end{aligned}$$



Зазначимо, що праві частини формул є гіперболічними функціями

$$\begin{aligned}\sin q_B &= \operatorname{sch}(vt/L), \\ \cos q_B &= -\operatorname{th}(vt/L).\end{aligned}$$

Оперуючи останніми формулами, отримаємо параметричні рівняння руху сейсмічного обладнання (2.18):

$$\begin{aligned}x_B &= vt - L \operatorname{th}(vt/L), \\ y_B &= L \operatorname{sch}(vt/L).\end{aligned}\tag{2.18}$$

Рівняння руху сейсмічного обладнання дозволяють визначити проекції його швидкості на осі координат:

$$\begin{aligned}v_{Bx} &= dx/dt = v_t h^2(v_t/L), \\ v_{By} &= dy/dt = -v \operatorname{sch}(-v_t/L) / \operatorname{ch}^2(v_t/L)\end{aligned}$$

і, відповідно, модуль вектора швидкості:

$$v_B = v_t h(v_t/L) = -v \cos q_B.$$

Використовуючи систему рівностей (2.19), можна знайти прискорення точки B , відповідно, на осях OX і OY :

$$\begin{aligned}w_{Bx} &= d^2x/dt^2 = (2v^2/L) \operatorname{sch}^2(v_t/L) \operatorname{th}(v_t/L), \\ w_{By} &= d^2y/dt^2 = (v^2/L) \operatorname{sch}(v_t/L) (2\operatorname{th}^2(v_t/L) - 1).\end{aligned}$$

Модуль прискорення в точці B матиме вигляд:

$$w_B = (v^2/L) \operatorname{sch}(v_t/L) = (v^2/L).$$

Для дотичного прискорення в цій точці отримаємо

$$w_{Bt} = (v^2/L) \operatorname{sch}^2(v_t/L),$$

а для нормального прискорення справедливим є вираз

$$w_{Bn} = (v^2/L) \operatorname{sch}(v_t/L) \operatorname{th}(v_t/L).$$

Враховуючи взаємозв'язок між тригонометричними та гіперболічними функціями, отримаємо

$$q_B = \arcsin(\operatorname{sch}(v_t/L)).$$

Кутова швидкість і кутове прискорення відрізка AB дорівнює:

$$\begin{aligned}\omega &= -(v/L) \operatorname{sch}(v_t/L), \\ \varepsilon &= (v^2/L^2) \operatorname{th}(v_t/L) \operatorname{sch}(v_t/L).\end{aligned}$$



Враховуючи властивості гіперболічних функцій, швидкість маломорехідного об'єкта при буксируванні здатна змінюватися від нуля при $t = 0$ до значення v при $t \rightarrow \infty$.

Аналогічно методу визначення швидкості маломорехідного об'єкта при буксируванні, можна визначити інші кінематичні характеристики, наприклад, траєкторію руху маломорехідного об'єкта при його буксируванні з врахуванням відхилення судна-буксира. Визначені особливості кінематичного стану маломорехідного об'єкта дозволять враховувати його параметри при розробці проекту буксирування й плану буксирування лінією із врахуванням умов навколишнього середовища із дотриманням норм навігаційної безпеки.

6.3. Модель оцінювання навігаційної небезпеки при стаціонарному буксируванні сейсмічного обладнання

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 смузії положення й з урахуванням фіксованої ймовірності знаходження сейсмічного обладнання та буксирувальника в цій смузії. Стан навігаційної безпеки при стаціонарному плаванні за заданим планом переходу курсу можна описати векторним лінійним рівнянням [4].

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 (3.1):

$$\frac{dY}{dt} = a(Y, t) + b(Y, t)\Theta, Y(t_0) = Y_0, \quad (3.1)$$

де Y – n -мірний вектор стану навігаційної безпеки системи «буксирувальник – сейсмичне 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 $f(y_0)$ [5].

На підставі літературних джерел [6, 7] допустимо, що щільність ймовірності розподілу фазових координат $\omega(y, t)$ системи (3.1) 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 [5].

Його складові за позитивними напрямками осей координат дорівнюють (3.2):

$$\pi_i(y, t) = A_i(y, t)\omega(y, t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\partial [B_{ij}(y, t)\omega(y, t)]}{\partial y_i}, \quad (3.2)$$

де A_i – коефіцієнт зносу;

B_{ij} – коефіцієнти дифузії, які для рівняння (3.2) 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 (3.2) необхідно розглядати в якості рівняння збереження імовірності, при цьому кількість імовірності, яка проходить за одиницю часу в позитивному напрямку характеризується потоком π_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^δ , де відбувається процес поглинання [8]. Дане припущення підтверджується інтегруванням рівняння (3.26) при дотриманні заданих граничних умов, що впливають із фізичного змісту забезпечення безпечної навігації.

У зв'язку з цим доцільно наділити границю сфероїда S_q^δ функцією поглинання $v^*(y, t)$ [8]. При цьому поглинання станів навігації буксирної системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» описується узагальненим рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова [9] (3.3):

$$\frac{\partial \omega^*(y, t)}{\partial t} = -div \pi^*(y, t) - v^*(y, t), \tag{3.3}$$

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 $v^*(y, t)$ [5]. Допустимо, що процес поглинання протікає на поверхні сфероїда і його можна описати рівнянням (3.4):

$$v^*(y, t) = \delta(a(y) - \gamma(t)) c_1(t) (n^0 \pi(y, t)), \tag{3.4}$$

де $a(y) - \gamma(t)$ – параметричне рівняння гіперповерхні сфероїда, який є



границею фазової області W ;

δ – дельта-функція;

n^0 – зовнішня нормаль до поверхні сфероїда S_q^δ ;

$c_1(t)$ – коефіцієнт повноти поглинання.

Введення рівнянь поглинання дозволяє знайти рішення (3.4) для всієї області фазового простору системи (3.1) 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 диференціальне рівняння її змін. Проінтегрувавши рівняння (3.3) по нескінченній області існування вектора Y , отримаємо диференціальне рівняння (3.5):

$$P_1^*(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} v^*(y, t) \partial y, \quad (3.5)$$

оскільки

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



Далі, підставивши у праву частину (3.5) з (3.4) залежність $v^*(y, t)$ та нормуючи $\omega^*(y, t)$, отримаємо (3.6):

$$P_1^*(t) = P_1 c_1 - \int_S (n^0 \pi(y, t)) \partial y, \quad (3.6)$$

де S – поверхня заданого сфероїда S_q^δ ;

$\pi(y, t)$ – 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^δ для функції поглинання буде пропорційним щільності ймовірності перебування всередині

$$v^*(y, t) = c_2(t)\omega^*(y, t) \quad (3.7)$$

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

Далі, помістивши (3.7) у праву частину формули (3.6), отримаємо (3.8):

$$P_1^* = -P_1 \int_{S_q^\delta} c_2(t)\omega(y, t) dy. \quad (3.8)$$

Запишемо отримані залежності (3.6) та (3.8) у скороченому вигляді (3.9):

$$P_1^* = -P_1 \eta(t), \quad (3.9)$$

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

Введена до рівняння (3.9) функції $\eta(t)$ 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 (3.9) при фіксованій початковій умові $P_0(t_0 = 0) = 1$ використаємо залежність (3.10):

$$P_1(t) = \exp \left[- \int_0^t \eta(\tau) d\tau \right], \tag{3.10}$$

отже, імовірність переходу буксирної системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» у небезпечний стан за межі поверхні сфероїда S_q^δ може бути визначено за формулою (3.11):

$$P_0(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \eta(\tau) d\tau \right]. \tag{3.11}$$

Тому, зафіксувавши значення верхньої границі $P_1(t)$ у формулі (3.9) або нижньої границі $P_0(t)$ у формулі (3.11) 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^δ , 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:

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



$$v(y, t) = \frac{v^*(y, t)}{P_0(t)}. \quad (3.12)$$

Диференціальне рівняння (3.12), отримане з формули (3.3) з урахуванням позиції (3.9), 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.

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.

6.4. Оцінювання впливу людського фактору та формування матриці екстремальності

Комплекс особистісних характеристик судноводія визначає його підготовленість до зустрічі з різними об'єктивними та суб'єктивними перешкодами, його стійкість до ймовірних негативних впливів з боку зовнішнього середовища. Отже, екстремальність – це не просто характеристика зовнішнього середовища або навігаційної ситуації, а показник специфічного стану системи «судноводій в ситуації», що змінюється у визначеному інтервалі в залежності від різних факторів. У загальному вигляді екстремальність E можна уявити як складну функцію [9, 10] (4.1):

$$E = f(CNS, HF), \quad (4.1)$$

де CNS – складність навігаційної ситуації (Complexity of Navigational



Situation);

HF – комплексний показник, який характеризує стан судноводія, який обумовлює якість прийнятих та виконуваних ним рішень (Human Factor).

Аналітично описати функцію (4.2) досить складно.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \tag{4.2}$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – формалізовані оцінки факторів небезпеки.

Однак можна використовуватися табличним представленням, ідея якого також була підказана в числі іншого та матрицею, що використовується Реєстром для оцінки ризиків у судноводінні [11, 12].

Використовуючи принцип побудови матриці ризиків Реєстру, сформуємо матрицю екстремальності (рисунок 4.1), що описує залежність (4.1).

Людський фактор	Дуже низький рівень	5	УЕ (5)	ВЕ (10)	ВЕ (15)	ОВЕ (20)	ОВЕ (25)
	Низький рівень	4	НЕ (4)	УЕ (8)	ВЕ (12)	ОВЕ (16)	ОВЕ (20)
	Середній рівень	3	НЕ (3)	УЕ (6)	ВЕ (9)	ВЕ (12)	ВЕ (15)
	Високий рівень	2	НЕ (2)	НЕ (4)	УЕ (6)	УЕ (8)	ВЕ (10)
	Дуже високий рівень	1	НЕ (1)	НЕ (2)	НЕ (3)	НЕ (4)	УЕ (5)
МАТРИЦЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОСТІ Варіант А.			1	2	3	4	5
			Низька	Помірна	Середня	Висока	Дуже висока
		Складність навігаційної ситуації					

Рисунок 4.1 – Матриця екстремальності. Варіант А

Джерело: [11, 12]

Наведений на рисунку 4.1 принцип розрахунку показника (рівня) екстремального у вигляді добутку невиправданий. Якщо у випадку матриці ризиків можливо допустити, враховуючи цілі її використання, що ступінь ризику визначається добутком частотності кількісної оцінки наслідків, то екстремальність залежить від людського фактору та характеру навігаційної



ситуації більш складним чином.

Вирішити цю проблему допоможе постановка експерименту на навігаційному тренажері, суть якого буде описана нижче. Результатом такого експерименту буде оцінка адекватності поведінки судноводія в навігаційних ситуаціях різної складності.

Крім того, кількість рівнів людського фактору та рангів складності навігаційної ситуації, що дорівнює п'яти (як показано в матриці екстремальності на рисунок 4.1) не можна вважати достатнім та забезпечити необхідну точність оцінювання впливу людського фактору на навігаційну безпеку плавання. Оптимальним тут є розмір матриці екстремальності 10×10 . Обґрунтування такого розміру (шкал оцінювання складності навігаційної ситуації та людського фактору) буде наведено нижче, оскільки процес конструювання шкал обумовлений рядом різних факторів, як вже розкритих, так і тих, що отримають своє пояснення у наступних підрозділах [13].

Оцінки людського фактору (рівні стресостійкості) більш виправдані для розміщення в порядку, зворотному зображеному на рисунку 4.1, тобто більш високому рівню повинні відповідати більш високі оцінки, що полегшить візуальне сприйняття матриці екстремальності. Виходячи з цих позицій, можна також відмовитися від дублювання у матриці екстремальності кількісних оцінок якісними, видаливши останні.

Таким чином, враховуючи викладене, можна надати крайній матриці екстремальності інший, ніж наведений на рисунку 4.1, зміст (рисунок 4.2).

У кожній комірці цієї матриці представлені поки умовні, а не отримані експериментально, середні значення $B_{\text{сер.}ij}$ оцінок $B_{\text{сер.}kj}$ адекватності поведінкової реакції судноводіїв з рівнем стресостійкості P_i в навігаційній ситуації рангу R_j складності, яка буде розраховуватись для k випробуваних судноводіїв. Природньо, що реальні значення таких середніх у загальному випадку будуть іншими.



Рівень стресостійкості	1	4,1	4,0	3,9	3,4	2,8	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1
	2	4,2	4,1	4,0	3,4	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2
	3	4,4	4,3	4,2	3,5	3,3	3,0	2,6	2,5	2,4	2,2
	4	4,5	4,4	4,3	3,7	3,5	3,3	2,8	2,5	2,4	2,3
	5	4,6	4,5	4,5	4,3	3,7	3,5	3,0	2,6	2,7	2,5
	6	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,6	3,4	3,0	2,8	2,7
	7	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,8	3,7	3,6	3,3
	8	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,8	3,7	3,6
	9	4,9	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	4,0	3,9
	10	5,0	4,9	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	4,0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Ранг складності навігаційної ситуації										

Рисунок 4.2 – Матриця екстремальності. Варіант Б

Джерело: розроблено автором

У залежності від значень $B_{сер.ij}$ матриця буде розділена на такі декілька областей:

– «червона область» ($B_{сер.ij} < 3$, комірки заштриховані) – область однозначно екстремальних навігаційних ситуацій (критична область);

– «жовта область» ($3 \leq B_{сер.ij} < 4$) – область неоднозначно екстремальних навігаційних ситуацій (буферна, проміжна область);

– «зелена зона» ($B_{сер.ij} \geq 4$, значення виділені курсивом) – область однозначно неекстремальних ситуацій (безпечна зона).

Однак мало ймовірно, що після проведення експерименту буде отримана матриця екстремальності з діагональним розташуванням областей, оскільки максимально високий рівень стресостійкості (гіперстійкість) судноводія, що межує з ригідністю, скоріш шкідливий, ніж корисний для навігаційної безпеки. Таким чином, приходимо від першого до третього, більш ймовірного, але не останнього виду матриці екстремальності (рисунок 4.3).

Варіанти А, Б, В цієї матриці наочно ілюструють еволюцію міркувань, результатом якої є матриця Г, наведена на рисунку 4.4.

Необхідність її побудови обумовлена однією причиною, суть якої полягає у такому. Матриця В (рисунок 4.3), як вже було вказано раніше, містить у своїх комірках середні оцінки адекватності поведінкової реакції судноводіїв, значення



яких варіюються згідно від обраного алгоритму від двох до п'яти, причому меншій екстремальності відповідає більше значення.

Рівень стресостійкості	1	4,1	4,0	3,9	3,4	2,8	2,7	2,5	2,4	2,2	2,1
	2	4,2	4,1	4,0	3,4	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3	2,2
	3	4,4	4,3	4,2	3,5	3,3	3,0	2,6	2,5	2,4	2,2
	4	4,5	4,4	4,3	3,7	3,5	3,3	2,8	2,5	2,4	2,3
	5	4,6	4,5	4,5	4,3	3,7	3,5	3,0	2,6	2,7	2,5
	6	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,6	3,4	3,0	2,8	2,7
	7	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,8	3,7	3,6	3,3
	8	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,8	3,7	3,5
	9	4,9	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,2	3,8	3,6
	10	5,0	4,9	4,8	4,7	4,5	4,3	3,5	3,4	2,8	2,0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Ранг складності навігаційної ситуації										

Рисунок 4.3 – Матриця екстремальності. Варіант В

Джерело: розроблено автором

Рівень стресостійкості	1	0,30	0,33	0,37	0,53	0,73	0,77	0,83	0,87	0,93	0,97
	2	0,27	0,30	0,33	0,53	0,67	0,73	0,80	0,87	0,90	0,93
	3	0,20	0,23	0,27	0,50	0,57	0,67	0,80	0,83	0,87	0,93
	4	0,17	0,20	0,23	0,43	0,50	0,57	0,73	0,83	0,87	0,90
	5	0,13	0,17	0,17	0,23	0,43	0,50	0,67	0,80	0,77	0,83
	6	0,10	0,13	0,17	0,20	0,27	0,47	0,53	0,67	0,73	0,77
	7	0,10	0,10	0,13	0,17	0,20	0,27	0,40	0,43	0,47	0,57
	8	0,07	0,10	0,10	0,13	0,17	0,20	0,27	0,40	0,43	0,50
	9	0,03	0,07	0,10	0,10	0,13	0,17	0,20	0,27	0,40	0,47
	10	0,00	0,03	0,07	0,10	0,17	0,23	0,50	0,53	0,73	1,00
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Ранг складності навігаційної ситуації										

Рисунок 4.4 – Матриця екстремальності. Варіант Г

Джерело: розроблено автором

Однак таке уявлення екстремальності цілком зручно та наочно. Тому пропонується в кінцевій (робочій) матриці використовувати принцип «більш екстремальним ситуаціям відповідає більше значення критерія», а діапазон можливих значень прийняти від нуля до одиниці.

З цією метою замість елементів матриці $B_{сер.ij}$ матриці В необхідно записати



значення E_{ij} , розраховані у даному випадку за формулою:

$$E_{ij} = 1 - (B_{ij} - 2)/3. \quad (4.3)$$

Тоді області матриці будуть визначатися такими значеннями екстремального показника E_{ij} : червона – більше 0,66, жовта – від 0,33 до 0,66, зелена – менше 0,33.

6.5. Рекомендації щодо побудови суднової автоматизованої системи прогнозування ризиків буксирувальних операцій

Технічне та інформаційне забезпечення сучасних морських суден дозволяє у більшій частині автоматизувати процес отримання даних, необхідних для визначення складності й екстремальності навігаційної ситуації при проведенні буксирування. Це дозволяє сформувати суднову автоматизовану систему прогнозування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та урахування ризиків маневрування при буксируванні сейсмічного обладнання.

Зазначена система повинна мати у своєму складі:

- 1) організаційну структуру;
- 2) загальну модель системи разом з об'єктами моніторингу;
- 3) комплекс технічних засобів;
- 4) моделі навігаційних ситуацій при проведенні буксирування;
- 5) методи спостереження, обробки даних, аналізу ситуації і прогнозування;
- 6) інформаційно-комунікаційну систему.

Організаційна структура запропонованої системи містить у собі:

- 1) судноводія, який є органом управління системи та приймає рішення;
- 2) автоматизовану підсистему спостереження, яка в режимі реального часу забезпечує систему даними про стан параметрів, які піддаються врахуванню та вимірюванню;
- 3) підсистему баз даних параметрів, які підлягають урахуванню та є постійними протягом тривалих проміжків часу при проведенні буксирувальної



операції або можуть бути прогнозовані сторонніми сервісами;

4) обчислювальну підсистему, яка ґрунтується на матриці екстремальності та дозволяє провести кількісну оцінку ймовірності виникнення надзвичайної ситуації при проведенні буксирування сейсмічного обладнання.

Останні три елементи представляють собою інформаційну автоматизовану систему, яка забезпечує вимірювання та збір даних, підготовку, зберігання, обробку, аналіз та візуалізацію інформації.

Загальна модель системи, що відображає можливість розвитку надзвичайної ситуації, джерелом якої є ризики маневрування при проведенні буксиральної операції, наведена у другому та третьому розділах дисертаційної роботи.

Комплекс технічних засобів має у своєму складі навігаційне, гідрометеорологічне та інше суднове обладнання, необхідне для вимірювання параметрів, які визначають стан компонент навігаційної ситуації.

Ситуаційні моделі повинні підтримувати загальний опис ситуацій, комплекс характеристик та вхідних вимірювальних параметрів, а також критерії прийняття рішень.

Загальний опис ситуацій описується сукупністю базових коефіцієнтів. До комплексу вимірюваних параметрів входять всі параметри, які визначають стан компонент навігаційної ситуації.

Критерії прийняття рішень встановлені матрицею екстремальності, яка має ділення на три області.

Основний метод спостереження в системі – інструментальний. Обробка результатів, аналіз ситуації та прогнозування проводяться на основі запропонованого методу кількісної оцінки впливу людського фактору на навігаційну безпеку плавання судна.

Вихідним параметром системи прогнозування є екстремальна навігаційна ситуація, прив'язана до певної точки та конкретного району плавання.

Оперативне (поточне) прогнозування є відображенням ймовірності виникнення надзвичайної ситуації з періодом упередження, безпосередньо прилеглим на осі часу до поточного моменту. Таким чином, оперативний



прогноз екстремальності розраховується на перспективу, протягом якої не очікується суттєвих змін спостережуваних параметрів навігаційної ситуації. Для розрахунку прогнозованого значення її складності навігаційної ситуації необхідно використовувати поточні значення характеристик її компонент.

Строк упередження короткочасного прогнозування знаходиться в межах часу проходження судном акваторією одного типу. Короткочасний прогноз формується не пізніше, ніж за 4 години до початку слідування акваторією та коригується кожні 4 години. Таким чином, якщо час переходу судна в певній акваторії становить кілька днів, то перший короткостроковий прогноз формується через чотири години (в оперативний час мінус 4 години). Перше коригування відбувається в оперативний час нуль, при цьому формується короткостроковий прогноз на оперативний час від 4 до 28 годин.

Для розрахунку прогнозованого значення складності навігації в короткостроковому прогнозі використовуються значення, які зберігаються в базах даних характеристик навігаційної ситуації, які при необхідності можуть бути скориговані поточними значеннями.

Довготривалий прогноз формується на всю операцію з буксирування та перед ним під час попередньої прокладки. У цьому випадку також використовуються значення, які зберігаються у базах даних.

Система має включати до свого складу такі бази даних:

– база даних 1 (БД-1) містить отримані з лоцій, карт, атласів та інших посібників статистичні данні щодо забезпечення навігаційної безпеки, видимості, вітру, хвилювання, течій, інтенсивності суднопотоку, льодової обстановки, обмерзання та місцевих правил для різних акваторій у різні періоди часу (БД-1 є практично незмінною);

– база даних 2 (БД-2) містить отриману із зовнішніх джерел інформацію про історію інтенсивності судноплавства в різних районах, а також про поточний трафік;

– база даних 3 (БД-3) містить прогнозну інформацію, отриману від різних метеорологічних сервісів та адаптовану за допомогою програмного забезпечення



для використання в судновій автоматизованій системі управління (БД-3 оновлюється з кожним новим прогнозом сервісу);

– база даних 4 (БД-4) містить картографічну інформацію, яка знаходиться в електронній картографічній навігаційно-інформаційній системі, включаючи глибину та забезпеченість засобами навігаційного забезпечення;

– база даних 5 (БД-5) містить дані про змінні течії;

– база даних 6 (БД-6) містить інформацію про судно та рейс, включаючи маршрут переходу, водотоннажність та відповідну осадку, швидкість та курс, заплановані на різних ділянках маршруту, стан та характер буксирувального обладнання;

– база даних 7 (БД-7) містить дані про штурманський склад судна, включаючи результати оцінювання людського фактору.

Джерела отримання інформації про значення необхідних для роботи системи параметрів наведені в таблиці 5.1.

Загальна схема системи наведена на рисунку 5.1.

Основним елементом є сервер – програмно-апаратний комплекс, призначений для збору та обробки даних, отриманих від комплексу технічних засобів і від зовнішніх по відношенню до судна джерел, зберігання та обслуговування баз даних і виконання програмних кодів розрахунку екстремальності для різних видів прогнозування ризиків буксирувальної операції.

З таблиці 5.1 впливає склад комплексу технічних засобів, що беруть участь у системі (на рисунку 5.1 комплекс виділяється пунктирно): глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), ехолот, датчики осадки, суднова метеостанція, двокомпонентний лаг, радіолокаційна станція (РЛС), засоби автоматичної радіолокаційної прокладки (ЗАРП), автоматична ідентифікаційна (інформаційна) система (АІС). ЕКНІС (електронна картографічна навігаційна інформаційна система) тут віднесена не до технічних, а до програмних засобів.

Апаратна частина сервера – комп'ютер – одночасно виконує функції блоків управління та індикації.



Таблиця 5.1 – Джерела інформації для прогнозування

№ п/п	Параметр, компонента	Джерела		
		Оперативне прогнозування	Короткочасне прогнозування	Довготривале прогнозування
1	вид акваторії	ГНСС, БД-4(ЕКНІС)	БД-4, БД-6	БД-4,БД-6
2	глибина	ехолот, датчики осадки	БД-4,БД-6	
3	забезпеченість навігаційними засобами	БД-1,БД-4		
4	наявність підводних та надводних перешкод	БД-4	БД-1,БД-4	
5	швидкість вітру	суднова метеостанція	БД-1,БД-3	БД-1
6	курсний кут вітру	суднова метеостанція	БД-3(напрямок вітру), БД-5(курс судна)	БД-1(напрямок вітру), БД-5(курс судна)
7	хвилювання	<i>вручну</i>	БД-1,БД-3	БД-1
8	курсний кут хвилювання	<i>вручну</i>	БД-3(напрямок вітру), БД-6(курс судна)	БД-1(напрямок вітру), БД-6(курс судна)
9	швидкість течії	двокомпонентний лаг	БД-1,БД-3	БД-1
10	курсний кут течії	двокомпонентний лаг	БД-3(напрямок вітру), БД-6(курс судна)	БД-1(напрямок вітру), БД-6(курс судна)
11	видимість	<i>вручну</i>	БД-3	БД-1
12	льодова обстановка	<i>вручну</i>	БД-3	БД-1
13	обмерзання	<i>вручну</i>	БД-3	БД-1
14	інтенсивність та щільність руху суден	РЛС, ЗАРП, АІС,БД-2	БД-2	БД-2
15	кількість небезпечних цілей	РЛС, ЗАРП, АІС,БД-2	БД-2	БД-2
16	швидкість судна	лаг, ГНСС	БД-6	БД-6
17	розміри судна	БД-6	БД-6	БД-6
18	місцеві правила	БД-1	БД-1	БД-1
19	оцінювання людського фактору	БД-7	БД-7	БД-7

Авторська розробка

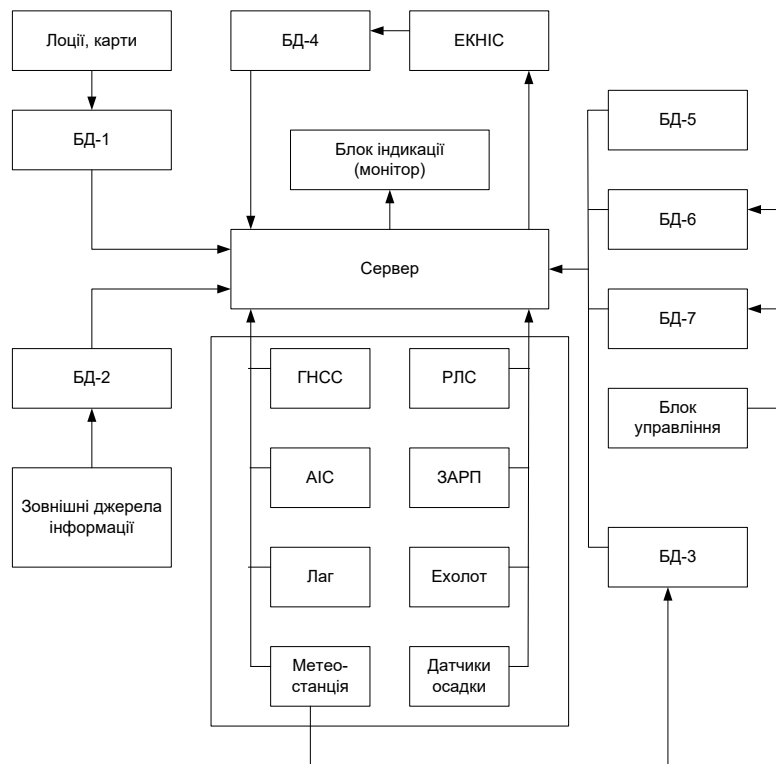


Рисунок 5.1 – Загальна схема автоматизованої системи прогнозування надзвичайної ситуації

Джерело: розроблено автором

Основний блок управління є діалоговою програмою, за допомогою якої користувач може регулювати доступні для цього налаштування та завантажує дані безпосередньо в алгоритми та у відповідні бази, які формуються вручну.

Блок індикації призначений для відтворення (візуалізації) розрахованих (прогнозованих) значень екстремальності на моніторі серверу та сигналізації про критичні поточні значення.

Відображення екстремальності при короткочасному та довготривалому прогнозуванні прикріплюються до часу, місця та конкретного відрізка лінії шляху (очікуємої лінії), побудованої при попередній прокладці.

Як блок управління, так і блок індикації можуть бути виконані периферійними та представляти собою окремі пристрої введення, управління та відображення, пов'язаними з сервером.

Оптимальним засобом відображення результатів роботи системи (безпосередньо прогнозу екстремальності та ризиків маневрування) є ЕКНІС.



Принципи побудови ЕКНІС дозволяють використовувати додатковий шар (накладку) з прогнозною інформацією про ймовірність виникнення надзвичайної ситуації. Цей шар може містити цифрову та графічну інформацію для оперативного, короткочасного та довготривалого прогнозу.

Цифрова інформація може відображатися або постійно (в операційному прогнозі), або при наведенні курсору на судно (при оперативному прогнозуванні), або на очікуваній лінії шляху (при короткочасному та довготривалому прогнозуванні).

Графічне відображення екстремальності визначається або кольором маркера судна (при оперативному прогнозуванні), або кольором очікуваної лінії шляху (при короткочасному та довготривалому прогнозуванні).

6.6. Метод оцінювання складності навігаційної ситуації

Під складністю навігаційної ситуації слід розуміти об'єктивну порівняльну міру зусиль, необхідних для забезпечення безпеки мореплавства у цій навігаційній ситуації.

У результаті змістовного аналізу компонент навігаційної ситуації сформуємо кінцеві множини значень їх характеристик, приналежність до яких можна визначити як за якісним, так і за кількісним описом множин (таблиця 6.1).

Найбільшу проблему при формуванні множин створює відсутність загальноприйнятої класифікації акваторій плавання. Сучасна теорія та практика мореплавства забезпечує об'ємні множини класифікацій, складені за різними ознаками. Більшість з поданих класифікацій мають критерії у вигляді відстані від берега або навігаційної небезпеки, але встановлені вони тільки формально та інтуїтивно, без будь-якого обґрунтування. У цілях даного дослідження для визначеності була прийнята класифікація ІНО-89, що передбачає три види акваторії: зону відкритого моря, зону прибережного плавання (прибережну зону) та зону тісного плавання.



Таблиця 6.1 – Компоненти навігаційної ситуації

	Компоненти	0	1	2	3	4
1	Вид акваторії	-	зона відкритого моря	зона прибережного плавання	зона обмеженого плавання	-
2	Глибина	глибока вода	мілководдя	-	-	-
3	Забезпеченість навігаційними засобами	відмінна; зони дії ЗНЗ перекриваються	задовільна; зони дії ЗНЗ не перекриваються	погана; район плавання практично не забезпечений ЗНЗ	-	-
4	Наявність підводних або поверхневих перешкод	перешкоди відсутні	перешкоди рідкісні	перешкоди часті	-	-
5	Швидкість вітру	безвітря	слабкий 1-3 бали	сильний 4-5 бали	міцний 7-8 балів	штормовий 9-12 балів
6	Курсовий кут вітру	-	носовий (зустрічний вітер)	Кормовий(попутний вітер)	траверзний (боковий вітер)	-
7	Хвилювання	хвилювання відсутнє	незначне 1-3 бали	помірне 4-5 балів	значне 6-7 балів	жорстке 8-9 балів
8	Курсовий кут хвилювання	-	носовий	носовий	траверзний	-
9	Швидкість течії	течія відсутня	незначна (1-2 вуз)	середня (3-5 вуз)	велика (5-7 вуз)	значна (7 вуз)
10	Курсовий кут течії	-	попутна	зустрічна	траверзна	-
11	Видимість	відмінна понад 10 миль	добра 5-10 миль	середня 2-5 миль	погана 1-2 милі	дуже погана менш 1 милі
12	Льодова обстановка	лід відсутній	легка льодом вкрито менш 20% видимої поверхні моря	стримувана льодом вкрито 20-50% видимої поверхні моря	середньої тяжкості льодом вкрито 50-80% видимої поверхні моря	важка льодом вкрито більш 80% видимої поверхні моря
13	Обмерзання	немає	повільне (до 2 см/год)	швидке (2-6 см/год)	дуже швидке (більш 6 см/год)	-
14	Інтенсивність та щільність руху суден	судна в районі плавання відсутні	низька	середня	висока	-
15	Кількість небезпечних цілей	0	1	2	більш 2	-
16	Швидкість судна	-	низька до 5 вуз	середня 5-10 вуз	висока 10-15 вуз	дуже висока більш 15 вуз
17	Розміри судна	-	мале менш 40 м	середнє 40-100 м	велике 100-200 м	дуже велике більш 200 м
18	Місцеві правила	відсутні	детально регламентують плавання	регламентують деякі аспекти плавання	існують, але вкрай рідко протирічать	-

Авторська розробка

Зона тісного плавання має у своєму складі канали, вузькості, шхери, акваторії портів та гаваней з підходами до них, а також гирлові ділянки суднохідних річок. Плавання у зоні здійснюється, як правило, за строго



визначеними напрямками, забезпечуючи безпечний спосіб руху. Умови плавання у зоні відрізняються обмеженою свободою маневру та вимагають посиленого контролю за місцеположенням судна. На особливо складних ділянках зони встановлені системи та пости управління рухом суден, використовується лоцманська проводка суден.

Прибережна зона – частина моря, що лежить уздовж материкового узбережжя, берегів архіпелагів та окремих островів, в якій можливе візуальне та радіолокаційне спостереження прибережних орієнтирів. Ширина прибережної зони становить 30-50 миль. Плавання в зоні здійснюється в основному за рекомендованими шляхами або за фарватерами та тільки в окремих районах допускається вільне плавання.

Зона відкритого моря – водний простір океанів та морів, який лежить в основному за межами візуальної та радіолокаційної спостережливості берегових орієнтирів. Плавання в зоні відкритого моря вільне або на заявлених рекомендованих шляхах.

Велика кількість класифікацій пояснюється різноманітністю завдань, для рішення яких ці класифікації призначені, та практично нескінченною множиною факторів, які визначають особливості розмежування в конкретних районах плавання та перешкоджають створенню суворого універсального кількісного критерію розмежування. Разом з тим автоматична ідентифікація акваторії плавання, необхідна для автоматизації результатів цього дослідження, може базуватися на алгоритмі, заснованому на комплексі несуворих правил і суворих часткових (неуніверсальних) аналітичних критеріях.

В якості одного з таких критеріїв можливо використовувати відстань до берега або навігаційної небезпеки, що визначається виразом (6.1):

$$D_6 = \sqrt{K_1 K_C^2 + K_2 M_0^2} \quad (6.1)$$

де K_C – коефіцієнт точності числення;

M_0 – середньоквадратична похибка визначення місця судна;

$K_1 = 5112$ миля², $K_2 = 2500$ – коефіцієнти.

У таблиці 6.1 кожному компоненту навігаційної ситуації відповідає від двох



до п'яти множин. При цьому, чим більше номер множини, до якої належить поточне значення характеристики компоненти, тим складнішою є навігаційна ситуація (за інших рівних умов).

До основи методу покладемо кількісний критерій. Тоді основною задачею, яку необхідно було розв'язати при розробці методу, є визначення значень коефіцієнтів $K_{1,1}, K_{1,2}, \dots, K_{2,1}, K_{2,2}, \dots, K_{17,1}, K_{17,2}, \dots, K_{18,1}, K_{18,2}, K_{18,3}$ (або при іншому запису: $K_{i,j}$, де i – номер компоненти, j – номер множин цих компонентів), що відповідає кожній з остаточно множин. У такому випадку загальна кількість коефіцієнтів дорівнювала б 57 (без врахування нульових коефіцієнтів, що відповідає множинам з номером 0).

У суднобудуванні вважається практично аксіомою тезис про те, що навігаційна ситуація, принципи її сприйняття судноводієм у першу чергу визначаються акваторією плавання судна. Таким чином, в акваторіях різних видів (зони відкритого моря, прибережного або тісного плавання) компоненти мають різний вплив на складність навігаційної ситуації (мають різну вагу). Виходячи з цього, алгоритм розрахунку кількісного критерію був дещо змінений. Множник з коефіцієнтом K_1 був виключений з базової формули (3.1). При цьому змінилася й основна задача – тепер стало необхідно обчислити три набори по 54 базових коефіцієнти для визначення складності навігаційної ситуації для кожного виду акваторії (6.2):

$$CNS = 1 - (1 - K_2) \cdot (1 - K_3) \cdot \dots \cdot (1 - K_{17}) \cdot (1 - K_{18}) \quad (6.2)$$

з використанням свого набору базових коефіцієнтів.

Для визначення значення коефіцієнтів проведено експертне оцінювання, у процесі якого перед експертами були поставлені два завдання ранжування.

Перше завдання – в опитуваному листі №1 описані двадцять навігаційних ситуацій. Необхідно ранжувати їх за ступенями складності.

Друге завдання – в опитувальному листі №2 описані компоненти при визначенні складності навігаційної ситуації в акваторії кожного виду, їх також необхідно ранжувати за їх важливістю.

Опитувальні листи супроводжувалися описом завдань, глосарієм, де для



уникнення розбіжностей були дані визначення основним використовуваним термінам, а також наведений аналог таблиці 6.1.

До складу експертів увійшли авторитетні представники морської освіти та науки і спеціалісти-практики (капітани та старші помічники капітана) з досвідом несення ходової навігаційної вахти від 10 до 30 років.

Для формулювання першого завдання експертного оцінювання випадковим чином було відібрано 110 навігаційних ситуацій. При цьому для оцінки одному експерту пропонувалось лише 20 з них. Опитувальні листи формувалися таким чином. Спочатку без врахування експертної думки всі навігаційні ситуації були розділені на п'ять умовних груп за рівнем складності, тобто кожна група містила по 22 навігаційні ситуації. В опитувальному листі №1 для першого експерта включені по чотири ситуації з кожної з п'яти умовних груп. При формуванні опитувального листа №1 для другого експерта п'ять уже використаних навігаційних ситуацій, що відносяться до різних груп, були замінені іншими, але з тих самих апріорних груп (тобто навігаційна ситуація А може бути замінена навігаційною ситуацією тільки з тієї ж групи). В опитувальному листі для наступного експерта таким самим чином були замінені ще п'ять навігаційних ситуацій. Опитувальні листи формувалися до тих пір, поки кожна з навігаційних ситуацій не повторювалася чотири рази. Таким чином, кількість опитувальних листів дорівнювала 22, тобто для процедури оцінювання необхідно було залучити саме таку кількість експертів.

Наведені контрольні цифри (110 навігаційних ситуацій, з яких 20 ситуацій в одному опитувальному листі, 22 експерта) стали результатом аналізу придатності експертного оцінювання в контексті даного дослідження.

Кожна з навігаційних ситуацій в опитувальних листах описувалася приблизно таким чином: «Зона вітрового хвилювання, вітер 5 балів у ніс, зиб, брижі 2 бали у ніс, течія траверзна 1 вузол, видимість – більше 10 миль, ваше судно довжиною 90 м з сейсмічним обладнанням рухається зі швидкістю 4 вузли, відбувається дуже швидке обмерзання судна». Експертам необхідно було ранжувати запропоновані навігаційні ситуації за їх складністю,



розставляючи числа від 1 (найскладніша навігаційна ситуація) до 20 (найпростіша). При цьому був дозволений варіант думки експертів про рівність двох або більше навігаційних ситуацій – пропонувалося позначити ці ситуації єдиним числом (тоді кількість використаних чисел ставала менше 20).

При заповненні опитувального листа №2 експертам було запропоновано у залежності від ваги компоненти при визначенні складності навігаційної ситуації розставити три рази (для кожного виду акваторії) напроти кожної з компонент числа від 1 до 17. Якщо складність навігаційної ситуації, за думкою експерта, не залежить від якоїсь компоненти, то число замінював прочерк. При однакової значущості компонентів (рівності ваг) для визначення *CNS* виставлялося однакове за порядком число (а загальна кількість використаних чисел тоді ставала менше 17).

Обробка результатів опитування на аркуші №1 проводилась так. На першому етапі експерти, які вважали дві або більш навігаційних ситуацій рівними за складністю (тобто загальна кількість рангів була меншою за 20), переоцінили свої думки для відновлення 20-бальної шкали ранжування. Наприклад, нехай для будь-яких п'яти навігаційних ситуацій експерт вказав ранги 16; 17; 17; 17; 18, тобто, на думку експерта, три навігаційні ситуації були однакової складності. Тоді при переоцінці ранги записувались вже так: 16; 18; 17; 19; 20. Інший приклад: ранги 11; 12; 12; 13 переоцінювались в 11; 10; 12; 13.

На наступному етапі представлені експертами та вже переоцінені ранги переводилися у протилежну шкалу. Згідно з нею, самій складній навігаційній ситуації (з рангом 1) за опитувальним аркушем присвоювалося 20 балів, з рангом 2 – 19 і т. д., тобто сума кількості балів і рангу дорівнювала 21.

Після обчислення середнього арифметичного набраних балів для кожної зі 110 навігаційних ситуацій всі вони розташовувалися у порядку спадання цих значень. Далі виконувався якісний контекстний аналіз усіх наведених навігаційних ситуацій.

Допустимо, що складність навігаційної ситуації $CNS = 0,900$ для найскладніших (середній бал – 20), а для найпростіших (середній бал – 1) –



$CNS = 0,300$. Тоді інші навігаційні ситуації мають складність між значеннями 0,3 та 0,9, яка пропорційна обчисленому середньому балу. Тобто для перекладу значення ранга S на очікуване значення CNS використовувалось рівняння

$$CNS = 0,3 + \frac{0,9-0,3}{20-1}(S - 1). \quad (6.3)$$

Останнім етапом обробки результатів опитування на аркуші №1 є групування навігаційних ситуацій у залежності від типу акваторії та ранжування їх всередині груп за спаданням очікуваного значення CNS .

Аналогічно оброблялися результати опитування за аркушем № 2, але з додаванням нового етапу. Можливість поставити прочерк навпроти незначних, за думкою експертів, ранжованих компонент, призводить до зменшення їх кількості рангів. Для відновлення 17-бальної шкали переоцінюються ранги за вище описаною процедурою і враховується відношення кількості аналізованих компонент (тобто 17) до кількості значимих ранжованих компонент.

Результатом обробки результатів опитування на аркуші №2 є таблиця 6.2, в якій навпроти кожної з компонент вказаний середній ранг значущості цієї компоненти $A_{i,j}$ при визначенні складності навігаційної ситуації окремо для кожного виду акваторії.

Проаналізуємо інші способи вирішення поставленого завдання. Можливим підходом є узагальнення та багатофакторний або інформаційно-логічний аналіз інформації про стан навігаційної обстановки під час аварій та інцидентів на морі або про зміну характеристик суднопотоку при зміні навігаційних ситуацій на окремих акваторіях. Залежність характеристик суднопотоку від навігаційної ситуації не має строгої форми і відрізняється для різних акваторій. Така залежність може дати тільки приблизну оцінку коефіцієнтів лише тих компонент навігаційної ситуації, які не пов'язані з характеристиками суден та їх переміщенням. Проведений критичний аналіз більшості аварій та інцидентів на морі показав, що навігаційна ситуація не є основною причиною ймовірності морської події. Вона, як правило, поєднана з людським фактором.



Таблиця 6.2 – Ранги важливості компонент навігаційної ситуації

i	Компоненти навігаційної ситуації	Ранги		
		Зона відкритого моря, j = 1	Зона прибережного плавання, j = 2	Зона обмеженого плавання, j = 3
2	Глибина (мала або глибока вода)	1,60	8,91	12,68
3	Оснащеність району ЗНЗ	1,54	13,01	11,77
4	Наявність надводних і підводних перешкод	6,77	9,68	11,77
5	Швидкість вітру	13,38	10,06	8,07
6	Курсовий кут вітру	11,32	6,2	4,93
7	Сила хвилювання	15,05	10,07	4,89
8	Курс кутового хвилювання	12,43	5,52	2,93
9	Швидкість течії	3,03	5,38	7,61
10	Курсовий кут течії	2,43	5,91	5,00
11	Видимість	12,86	15,34	16,14
12	Льодова обстановка	9,31	9,76	5,25
13	Ступінь обмерзання	11,36	11,16	8,16
14	Інтенсивність та щільність руху суден	7,51	13,39	14,59
15	Кількість небезпечних цілей	5,81	11,64	14,00
16	Швидкість Вашого судна	4,75	8,20	11,43
17	Розміри Вашого судна	5,39	3,68	9,57
18	Якість та кількість місцевих правил	0,60	3,98	4,11

Авторська розробка

Таким чином, навігаційна ситуація – це суб'єктивно-об'єктивний феномен, суб'єктивність якого визначається як безпосереднім представленням його суб'єкту (судноводію), так і тим, що оцінені компоненти входять у поняття «навігаційна ситуація» за результатами аналізу практики судноводіння, тобто діяльності людини у процесі управління судном.

Для визначення базових коефіцієнтів з використання результатів експертного оцінювання, припустимо, що ці коефіцієнти відносяться один до одного, як це надано в таблиці 6.3 співвідношення вагових коефіцієнтів.

За даними таблиць 6.2 та 6.3 розраховуємо вагу коефіцієнтів для всіх трьох зон плавання (таблиці 6.4-6.6).



Таблиця 6.3 – Співвідношення вагових коефіцієнтів

Номер компоненти	Номер множини			
	1	2	3	4
2	$A_{2,j}$	-	-	-
3	$A_{3,j/2}$	$A_{3,j}$	-	-
4	$A_{4,j/2}$	$A_{4,j}$	-	-
5	$A_{5,j/4}$	$A_{5,j/2}$	$3A_{5,j/4}$	$A_{5,j}$
6	$A_{6,j/3}$	$2A_{6,j/3}$	$A_{6,j}$	-
7	$A_{7,j/4}$	$A_{7,j/2}$	$3A_{7,j/4}$	$A_{7,j}$
8	$A_{8,j/3}$	$2A_{8,j/3}$	$A_{8,j}$	-
9	$A_{9,j/4}$	$A_{9,j/2}$	$3A_{9,j/4}$	$A_{9,j}$
10	$A_{10,j/3}$	$2A_{10,j/3}$	$A_{10,j}$	-
11	$A_{11,j/4}$	$A_{11,j/2}$	$3A_{11,j/4}$	$A_{11,j}$
12	$A_{12,j/4}$	$A_{12,j/2}$	$3A_{12,j/4}$	$A_{12,j}$
13	$A_{13,j/3}$	$2A_{13,j/3}$	$A_{13,j}$	-
14	$A_{14,j/3}$	$2A_{14,j/3}$	$A_{14,j}$	-
15	$A_{15,j/3}$	$2A_{15,j/3}$	$A_{15,j}$	-
16	$A_{16,j/4}$	$A_{16,j/2}$	$3A_{16,j/4}$	$A_{16,j}$
17	$A_{17,j/4}$	$A_{17,j/2}$	$3A_{17,j/4}$	$A_{17,j}$
18	$A_{18,j/3}$	$2A_{18,j/3}$	$A_{18,j}$	-

Авторська розробка

Таблиця 6.4 – Вагові коефіцієнти для відкритого моря

Номер компоненти	Номер множини			
	1	2	3	4
2	1,60	-	-	-
3	0,77	1,54	-	-
4	3,39	6,77	-	-
5	3,35	6,69	10,04	13,38
6	3,77	7,55	11,32	-
7	3,76	7,52	11,29	1505
8	4,14	8,29	12,43	-
9	0,76	1,52	2,27	3,03
10	0,81	1,62	2,43	-
11	3,22	6,43	9,65	12,86
12	2,33	4,65	6,98	-
13	3,79	7,58	11,36	-
14	2,50	5,01	7,51	-
15	1,94	3,87	5,81	-
16	1,19	2,38	3,57	4,75
17	1,35	2,70	4,04	5,39
18	0,20	0,40	0,60	-

Авторська розробка



Таблиця 6.5 – Вагові коефіцієнти для зони прибережного плавання

Номер компоненти	Номер множини			
	1	2	3	4
2	8,91	-	-	-
3	6,50	13,01	-	-
4	4,84	9,68	-	-
5	2,51	5,03	7,54	10,06
6	2,08	4,16	6,24	-
7	2,52	5,03	7,55	10,07
8	1,84	3,68	5,52	-
9	1,34	2,69	4,03	5,38
10	1,97	3,94	5,91	-
11	3,83	7,67	11,50	15,34
12	2,44	4,88	7,32	9,76
13	3,72	7,44	11,16	-
14	4,46	8,93	13,39	-
15	3,88	7,76	11,64	-
16	2,05	4,10	6,15	8,20
17	0,92	1,84	2,76	3,68
18	1,33	2,65	3,98	-

Авторська розробка

Таблиця 6.6 – Вагові коефіцієнти для зони обмеженого плавання

Номер компоненти	Номер множини			
	1	2	3	4
2	12,68	-	-	-
3	5,89	11,77	-	-
4	5,89	11,77	-	-
5	2,02	4,03	6,05	8,07
6	1,64	3,29	4,93	-
7	1,22	2,44	3,66	4,89
8	0,98	1,95	2,93	-
9	1,90	3,81	5,71	7,61
10	1,67	3,33	5,00	-
11	4,03	8,07	12,10	16,14
12	1,31	2,63	3,94	5,25
13	2,72	5,44	8,16	-
14	4,86	9,73	14,59	-
15	4,67	9,33	14,00	-
16	2,86	5,72	8,57	11,43
17	2,39	4,78	7,18	9,57
18	1,37	2,74	4,11	-

Авторська розробка



Зрозуміло, що зміна значення одного будь-якого коефіцієнта призводить до зміни всіх інших. За допомогою формули (6.3), варіюючи значеннями коефіцієнтів, розраховані групи коефіцієнтів для кожного типу акваторій складності, включених до опитувального аркушу навігаційних ситуацій. Отримані коефіцієнти дали найменшу середньоквадратичну похибку (СКП) по відношенню до очікуваних значень CNS , отриманих за результатами експертного оцінювання. Усі розраховані базові коефіцієнти зведені до таблиці 6.7. При цьому СКП для коефіцієнтів, застосовуваних для акваторій різного типу, склали: а) в зоні відкритого моря – 0,108; б) в зоні прибережного плавання – 0,103; в) в зоні обмеженого плавання – 0,139.

Таблиця 6.7 – Розрахункові базові коефіцієнти

Номер компоненти	Вид акваторії	Номер множини			
		1	2	3	4
2	j=1	0,019	-	-	-
	j=2	0,156	-	-	-
	j=3	0,231	-	-	-
3	j=1	0,009	0,019	-	-
	j=2	0,114	0,228	-	-
	j=3	0,107	0,214	-	-
4	j=1	0,041	0,082	-	-
	j=2	0,085	0,170	-	-
	j=3	0,107	0,214	-	-
5	j=1	0,040	0,081	0,121	0,161
	j=2	0,044	0,088	0,132	0,176
	j=3	0,037	0,073	0,110	0,147
6	j=1	0,045	0,091	0,136	-
	j=2	0,036	0,073	0,109	-
	j=3	0,030	0,060	0,090	-
7	j=1	0,045	0,091	0,136	0,181
	j=2	0,044	0,088	0,132	0,177
	j=3	0,022	0,044,	0,067	0,089
8	j=1	0,050	0,100	0,150	-
	j=2	0,032	0,065	0,097	-
	j=3	0,018	0,036	0,053	-
9	j=1	0,009	0,018	0,027	0,037
	j=2	0,024	0,047	0,071	0,094
	j=3	0,035	0,069	0,104	0,138



Номер компоненти	Вид акваторії	Номер множини			
		1	2	3	4
10	j=1	0,010	0,020	0,029	-
	j=2	0,035	0,069	0,104	-
	j=3	0,030	0,061	0,091	-
11	j=1	0,039	0,077	0,116	0,155
	j=2	0,067	0,135	0,202	0,269
	j=3	0,073	0,147	0,220	0,293
12	j=1	0,028	0,056	0,084	0,112
	j=2	0,043	0,086	0,128	0,171
	j=3	0,024	0,048	0,072	0,095
13	j=1	0,046	0,091	0,137	-
	j=2	0,065	0,130	0,196	-
	j=3	0,049	0,099	0,148	-
14	j=1	0,030	0,060	0,091	-
	j=2	0,078	0,157	0,235	-
	j=3	0,088	0,177	0,265	-
15	j=1	0,023	0,047	0,070	-
	j=2	0,068	0,136	0,204	-
	j=3	0,085	0,170	0,255	-
16	j=1	0,014	0,029	0,043	0,057
	j=2	0,036	0,072	0,108	0,144
	j=3	0,052	0,104	0,156	0,208
17	j=1	0,016	0,032	0,049	0,065
	j=2	0,016	0,032	0,048	0,065
	j=3	0,043	0,087	0,130	0,174
18	j=1	0,002	0,005	0,007	-
	j=2	0,023	0,047	0,070	-
	j=3	0,025	0,050	0,075	-

Авторська розробка

Розрахований за виразом (6.3) значення CNS , дозволяє отримати ще один більш зручний для практичних цілей кількісну характеристику навігаційну ситуацію – ранг її складності (таблиця 6.8).



Таблиця 6.8 – Ранги складності навігаційної ситуації та їх опис

CNS	Ранг складності	Лінгвістичне найменування рангів та загальний опис навігаційних ситуацій
від 0,92	10	Критично важкі навігаційні ситуації. Плавання судна небажано та небезпечно. Існує висока ймовірність загибелі судна.
від 0,85 до 0,92	9	Важкі навігаційні ситуації. Для забезпечення безпеки плавання від судноводія вимагається постійної максимальної концентрації уваги, максимального прояву знань, досвіду та вміння приймати нестандартні рішення. Помилка судноводія, як правило, призводить до виникнення аварійної ситуації.
від 0,75 до 0,85	8	
від 0,65 до 0,75	7	Навігаційні ситуації середньої тяжкості (помірні). Для забезпечення безпеки плавання від судноводія вимагається постійної концентрації, прояву знань та досвіду. Швидкі дії повернення при прийнятті помилкового рішення дозволять судноводію запобігти виникненню аварійних ситуацій.
від 0,55 до 0,65	6	
від 0,45 до 0,55	5	Нормальні навігаційні ситуації. Для забезпечення безпеки плавання судноводію достатньо діяти у відповідності до загальноприйнятих алгоритмів, знання про які отримані під час теоретичної підготовки. У судноводія є достатньо часу, щоб виправити свою помилку.
від 0,35 до 0,45	4	
від 0,25 до 0,35	3	Легкі навігаційні ситуації. Для забезпечення безпеки плавання від судноводія вимагається мінімальних стандартних кроків. Помилка судноводія не є критичною.
від 0,15 до 0,25	2	
до 0,15	1	Надлегкі навігаційні ситуації. Для забезпечення безпеки плавання від судноводія, крім належного спостереження, будь-яких дій не вимагається.

Авторська розробка

6.7. Рекомендації щодо проектування буксирувальної операції з мінімізацією ризиків

Процес проектування надійної буксирувальної операції із пріоритетом мінімізації ризиків, залежить від ступеня поінформованості персоналу щодо планування і реалізації операції. Елементи організаційної структури, що забезпечує розробку і реалізацію проекту буксирування сейсмічного обладнання, має у своєму складі представників власника буксирувальника; представників власників сейсмічного обладнання та судноводія буксирувальника.

Нехай ці суб'єкти організаційної структури буксиру вальної операції



мінімізують деяку дійсну функцію $f^r = f^r(\lambda, y)$, що відображає ризики буксирувальної операції взагалі. Також допустимо, що функція $f^r = f^r(\lambda, y)$ визначена та безперервна на компактній множині $\Lambda^r \times Y^r$, яка у цьому випадку представляє собою простір вимог до плану буксирувальної операції й вимог до управління буксирувальником.

Допустимо подальшу реалізацію цієї функції за рахунок вибору способу управління з множини управлінь $y \in Y^r$, яка закріплена у плані проведення буксирувальної операції для мінімізації ризиків, які також враховуються при плануванні цієї операції.

Інтереси представників компаній при плануванні буксирувальної операції є домінуючими. Їх слід ототожнювати з бажанням і прагненням фахівців до максимізації більш загальної безперервної дійсної функції $\Phi^r = \Phi^r(\lambda, y)$, яка відображає ступінь їх поінформованості, породжуючи вимоги до управлінь при мінімізації витрат судновласників. Тому, для практичного планування функції $\Phi^r = \Phi^r(\lambda, y)$ необхідно шляхом додаткового запиту у менеджера компаній, що брав участь у буксируванні маломорехідного об'єкта, одержати всю необхідну інформацію виду $\lambda \in \Lambda^r$, де Λ^r вважаємо довільним компактом простору.

Це допущення дозволить розглядати інформацію λ , що надходить до зайнятих у плануванні фахівців, як функцію планових (можливих) управлінь, що мінімізують технологічні й навігаційні ризики у вигляді $\lambda = \lambda(y)$.

Порядок вибору всіх зазначених функцій і змінних при плануванні безпечної й маловитратної буксирувальної операції повинен бути таким. Спочатку фахівці, зайняті у плануванні буксирувальної операції, в результаті аналізу даних, що надходять від замовників, збирають інформацію $\lambda \in \Lambda^r$, що визначає стан безпеки цієї операції. Ця інформація є основою для розробки плану буксирувальної операції, який надходить до судноводія.

Судноводій на підставі попереднього досвіду й поточної навігаційної інформації повинен виділити множину навігаційних та технічних небезпек, які можуть виникнути у процесі буксирування. Необхідно ранжувати ці небезпеки, надавши їм значення відповідних ризиків. Виділені й проранжовані ризики



фіксуються у плані буксирувальної операції для управління ними при реалізації плану буксирувальної операції.

При плануванні не виключається той випадок, коли фахівцям із планування буксирувальної операції отриманої інформації недостатньо, і вони можуть звернутися за додатковою інформацією. Якщо, на думку фахівців із планування, необхідного рівня безпеки й малозатратності буксирувальної операції можна буде досягти при її проведенні із допустимою кількістю технологічних і навігаційних ризиків, то цим ризикам ставляться у відповідність управління у $\in Y^r$, які будуть прийняті до практичного використання судноводієм.

Далі цілком логічно допустити, що судноводій, який реалізує план буксирувальної операції, сприймає параметричні представлення функцій Φ^r , f^r та множин A^r , Y^r з певною часткою суб'єктивізму, з урахуванням людського фактору.

Тому додатково приймемо, що стан поінформованості судноводія стосовно технологічних і навігаційних ризиків у запланованій буксирувальній операції сейсмічного обладнання визначається деяким вектором r , який відображає ступінь поінформованості судноводія.

Сприйняття проєкту буксирувальної операції судноводія може бути визначене векторною множиною $\Omega = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ при $n < \infty$ можливих значеннях векторних норм ступеня його поінформованості.

Якщо в процесі розробки проєкта буксирувальної операції у судноводія з'являється можливість уточнити інформацію щодо умов проведення операції, то дані про наявність і пріоритетності технологічних і навігаційних ризиків, можуть бути суттєво доповнені й навіть змінені. Реалізуючи коректури даних у доповідях, судноводій може використовувати «зустрічний спосіб формування даних», коли додаткові запити про відсутні відомості в задокументованих вимогах λ , вибираються в такий спосіб:

$$\lambda = \lambda^*(s), \quad \lambda^*: \Omega \rightarrow \cup A^r, \\ r \in \Omega$$

з урахуванням попередньої векторної оцінки $s \in \Omega$ дійсного значення вектора,



що визначає ступінь поінформованості судноводія.

Далі використовуємо вищевикладений опис процесу планування буксирувальної операції і введений показник суб'єктивної інформованості судноводія r як елемента Ω векторної множини. Тоді, надійність реалізації проекту буксирувальної операції сейсмичного обладнання й поінформованості судноводія, представимо в такий спосіб (7.1):

$$K_1(r) = \max_{\lambda \in \downarrow \Lambda^r} \min_{y \in \text{Arg min } f^r(\lambda, y)} \Phi^r(\lambda, y), \quad (7.1)$$

В основі запропонованої моделі надійності реалізації проекту буксирної операції є допущення, що вона здатна забезпечити максимально гарантований результат за умови одержання судноводієм повної й об'єктивної інформації.

При наявності однієї точки екстремуму на множині Ω ймовірнісна модель дозволяє одержати оцінку зверху надійності реалізації безпечного проекту буксирувальної операції. Модель відображає властивості будь-якого процесу управління засобами підвищеної небезпеки, оскільки відповідає умові, що незалежно від вимог до малозатратності операції таке буксирування повинно здійснюватися при допустимих технологічних і навігаційних ризиках.

При організації буксирувальних операцій важливим є механізм, за допомогою якого здійснюється обмін інформацією між менеджерами компаній буксирувальника та «маломорехідного» об'єкта, які відповідають за прибуток або витрати, що супроводжують проведення буксирувальної операції. Із цієї причини з'являється необхідність додаткового розгляду умов, при яких компанії мають можливість реалізувати ці операції з погодженими інтересами у частині вирішення проблеми «безпека – витрати». З цією метою виділимо з організаційної підструктури, такі елементи: менеджера компанії, якій належить буксирувальник, і менеджера компанії, якій належить «маломорехідний» об'єкт. Об'єднаємо їх відповідними зв'язками, по яких передаються пріоритети у вимогах до підвищення безпеки, мінімізації ризиків й вимогах до витрат.

Результатом такого організаційного об'єднання є множина пар W виду



$$W = U \times V = \{(u, v) | u \in U, v \in V\},$$

де u – менеджер компанії, якій належить буксирувальник,

v – менеджер компанії, якій належить «маломорехідний» об'єкт.

Елементи пар з множини v можуть бути зв'язані очевидними відношеннями, які можна записати у такий спосіб (7.2):

$$\begin{aligned} u, v \in W, (u, v) \in r_1 &\Leftrightarrow v > u; \\ u, v \in W, (u, v) \in r_2 &\Leftrightarrow v < u. \end{aligned} \quad (7.2)$$

Відношення (7.2) свідчить про можливість адміністративного призначення пріоритетів у відношенні «ризиків – витрати» при розробці проекту буксирувальної операції за рахунок прийняття в компаніях вимог, які не відповідають дійсній поінформованості $r_j \in \Omega = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ для $n < \infty$.

Дійсно, з одного боку, менеджери компаній будуть розглядати стан поінформованості судноводія через призму витрат, і їх дійсним бажанням буде прагнення до жорсткості пріоритету економії цих витрат. З іншого боку, менеджери компанії, будучи відповідальними перед судновласниками за забезпечення безпеки буксирувальної операції, зацікавлені в жорсткості пріоритету безпеки цієї операції. Отже, у взаємодії елементів керівної ланки, що відповідає за відношення «ризиків – витрати», існує конфліктна ситуація, від рішення якої й залежить як рівень поінформованості судноводія r_j , так і вибір пріоритету у відношенні зменшення ризиків.

Важливими факторами вірної організації роботи й життєзабезпечення на судні, безаварійній експлуатації буксирувальників слід вважати повну об'єктивну поінформованість судноводія, який повинен володіти інформацією про політику компанії в галузі безпечної експлуатації суден, цілком і повністю володіти всією інформацією про технічні, навігаційні та юридичні особливості проведеної буксирувальної операції.

Якщо надалі аналізувати поінформованість судноводія як основу архітектури безпечної експлуатації буксирного каравану, з одного боку, й ефективності буксирувальної операції, з іншого боку, то, застосовуючи модель поінформованості, необхідно особливо звернути увагу на вибір $\lambda \in \Lambda^r$ у тих



випадках, коли у судноводія немає впевненості у вірогідності наявної у нього інформації. Відсутність впевненості у вірогідності інформації формально виразимо рівністю

$$\cap A^r = \emptyset.$$

$$r \in \Omega$$

Просто, але на практиці можна вирішити це завдання, перевіривши реалізованість усіх можливих випадків змісту інформації, отриманої від компаній-судновласників:

$$\lambda \in \cup A^r,$$

$$r \in \Omega$$

тобто, реалізацією методу послідовного перебору цих вимог з одночасним аналізом значень індикаторної функції, наведеної у такому вигляді:

$$\theta = \theta^r(\lambda) = \delta(\lambda|A^r) = \begin{cases} 1, & \text{при } \lambda \in A^r; \\ 0, & \text{при } \lambda \notin A^r. \end{cases}$$

Однак судноводій може використовувати більш практичний метод рішення поставленого завдання. Для цього достатньо дати судноводію можливість один раз здійснити реалізацію механізму «усвідомленого вибору». У випадку $\theta^r(\lambda) = 0$ судноводій змушений відмовляється від отриманих даних, або реалізувати вибір $\lambda \in A^r$ методом «проб та помилок». Метод «проб та помилок» ототожнимо з непередбаченим та інтуїтивним вибором:

$$\lambda^* = \eta \in A^r,$$

де $\eta \in N$ – фактор невизначеності, властивий вибору $\lambda \in A^r$.

До вибору інформації «проб та помилок» λ^* судноводій може підійти незалежно від стану своєї початкової інформованості.

Таким чином, вибір λ^* є переходом до інформаційного розширення, коли за контрольовану судноводієм змінну буде обрана функція λ_0 :

$$A_0 = \{\lambda_0 = \lambda(\theta, \eta)\} = \left\{ \begin{array}{l} \lambda, \theta = 1 \\ \eta, \theta = 0 \end{array} \middle| \lambda \in \cup A^r \right\} \cup \{\lambda^* = \lambda^*(\eta)\},$$

$$r \in \Omega$$

де роль λ^* виконує тотожність $\lambda^*(\eta) \equiv \eta$, а реалізація $\theta \in \{0,1\}$ матиме вигляд:

$$\theta = \theta^y(\lambda) = \delta(\lambda|A^r).$$



Непередбаченості результату вибору $\eta \in \Lambda^r$ і невизначеності (нечіткості) використання нормативної бази застосування судноводієм інформації λ^* слід аналізувати як «політику покарання» λ^p , що реалізується зі штрафом величиною $\psi(r)$.

Розглянута модель планування ефективної й безпечної буксирувальної операції демонструє, що при неповній поінформованості капітана останній повинен і змушений діяти при управлінні ризиками за принципом – «плануй і реалізуй, як знаєш, і нехай буде, як буде».

У той час неможливість передбачити результат вибору $\eta \in \Lambda^r$ при практичному здійсненні вже запланованих буксирувальних операцій з порушенням умов поінформованості судноводія буде виявляти вплив на поінформованість керівництва. Так, відсутність конкретних відомостей може змусити судноводія виявляти так звану «обережність» при складанні доповідей $\xi \in \mathcal{E}$, що йдуть по інформаційних зв'язках.

Під «обережністю» судноводія мається на увазі лише зміст цих доповідей. При цьому вибір змісту доповідей судноводієм ξ буде таким, щоб максимізувався (мінімізувався) критерій $g = g(\xi, \eta)$, який містить фактор невизначеності $\eta \in N$.

Але в цій ситуації судноводій може все ж таки використовувати принцип вибору, що не суперечать гарантованому отриманню запланованого результату. Таким чином, вибір змісту доповіді ξ буде визначатися множиною:

$$\mathcal{E}_{(\text{гар})} = \text{Arg max}[\min g(\xi, \eta)], \\ \xi \in \mathcal{E} \quad \eta \in N$$

Якщо η буде випадковою величиною з функцією розподілу $F(\eta)$, множину рішень визначимо як:

$$\mathcal{E}^* = \mathcal{E}_{(\text{гар})} \cap \mathcal{E}_{(\text{оср})},$$

де

$$\mathcal{E}_{(\text{оср})} = \text{Arg max} \int g(\xi, \eta) dF(\eta), \\ \xi \in \mathcal{E}$$

і множина \mathcal{E}^* завжди буде містити, як мінімум одну доповідь (одну крапку), що



максимізує (мінімізує) критерій $g = g(\xi, \eta)$. Тому судноводій має можливість вибрати зміст доповіді $\xi \in E^*$ так, щоб вибір одночасно максимізував як гарантії його положення, так і осереднений критерій $g = g(\xi, \eta)$.

Саме тому, проєкт щодо забезпечення безпеки буксирування конкретного маломорехідного об'єкта розробляється на основі проєкту перегону (переліку заходів щодо забезпечення безпеки перегону) у комплекті з технічною документацією й договором буксирування. Метою такого проєкту є конкретизація й обґрунтоване доповнення (але не дублювання) рекомендацій судноводія й представника власника буксируємого маломорехідного об'єкта, що входять до складу комплексу технічної документації, умов буксирування і у договір про морське буксирування або наймання буксирного судна.

Рекомендації щодо зменшення ризиків, у цілому, не повинні суперечити одна іншій та мають містити:

– основні характеристики сейсмічного обладнання, рекомендації щодо вибору оптимальних курсів та швидкості буксирування з урахуванням обмежень на буксирування за погодними умовами, використання місць укриття від непогоди, оцінці стану й поведінки сейсмічного обладнання;

– заходи й рекомендації, погоджені з умовами договору буксирування, щодо порятунку сейсмічного обладнання при виникненні аварійної ситуації;

– особливості підтримання зв'язку з береговими радіостанціями для забезпечення надійності буксирувальної операції протягом всього переходу, порядок радіообміну;

– інші обґрунтовані процедури й дії для мінімізації ризиків буксирування сейсмічного обладнання.

Таким чином, проведене дослідження свідчить, що відсутність у судноводія потрібної інформації буде позначатися на безпеці й ефективності планованої провідки буксирувальника.



Висновки

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. Реально траєкторія руху сейсмічного обладнання об'єкта при рисканні буксирувальника від генерального курсу залежить від ряду факторів: швидкості, бічної складової натягу буксира в точці підвісу, гідрометеорологічних умов.

Удосконалений метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирувальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу, в якому на відміну від відомих, ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції, що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

Розвиток методу визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування, який на відміну від відомих, відрізняється заміщенням руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки, що дозволяє при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника розглядати траєкторію сейсмічного обладнання як плоску криву, визначити при буксируванні різні кінематичні характеристики маломорехідного об'єкта і враховувати їх при розробці проекту буксирування для різноманітних умов навколишнього середовища із дотриманням норм



навігаційної безпеки.

Запропонована удосконалена 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.

Теоретичні дослідження щодо забезпечення навігаційної безпеки при реалізації буксирної операції свідчать, що траєкторія цього об'єкта асимптотично прагне до траєкторії буксирувальника й, при стаціонарності руху, буде перебувати в межах заданої смуги положення. Залучення до теоретичних досліджень принципу «мінімальної дії» і методу «усікання» до процесу буксирування каравану з маломорехідним об'єктом засвідчили, що ці гіпотези можуть бути причинами асимптотичного прагнення об'єкта до траєкторії буксирувальника і його розташування в спостережному кільватерному струмені.

Отримані співвідношення, визначаючи неявний закон взаємодії сил у системі буксирування, час досягнення сейсмічним обладнанням межі смуги положення й властивість стабільності (незмінності) буксирної системи в цілому, дозволяють вирішувати завдання щодо забезпечення навігаційної безпеки для цієї системи в умовах маневрування.

Для врахування людського фактору при оцінці ризиків маневрування при проведенні буксирувальної операції доцільно використовувати матрицю екстремальності.

Технічне та інформаційне забезпечення сучасних морських суден дозволяє у більшій частині автоматизувати процес отримання даних, необхідних для визначення складності й екстремальності навігаційної ситуації при проведенні буксирування. Це дозволяє сформувати судову автоматизовану систему



прогнозування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій та врахування ризиків маневрування при буксируванні сейсмічного обладнання.

Процес проектування надійної буксирувальної операції із пріоритетом мінімізації ризиків залежить від ступеня поінформованості персоналу щодо планування і реалізації операції. Для рішення проблемних навігаційних ситуацій при буксируванні сейсмічного обладнання вибір оптимальних по Парето управлінь не реалізується. Причиною такого стану справ є те, що виникаючі навігаційні ситуації містять залежні навігаційні небезпеки, обумовлені за допомогою фізичних величин з множини величин, які кваліфікуються як ризики.