

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА ПІД ЧАС РОЗХОДЖЕННЯ З СУДНАМИ, ЩО ВИКОНУЮТЬ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНІ РОБОТИ

Проведено аналіз особливостей організації безпечного маневрування морських суден у зонах виконання днопоглиблювальних робіт. Однією з ключових загроз у таких акваторіях визначено обмежену маневреність суден днопоглиблювального флоту, а також змінну просторову конфігурацію навігаційних перешкод, зумовлених розташуванням шлангів, якорів і обладнання. Встановлено, що традиційні підходи до прогнозування та ухилення від зіткнень не враховують змінність геометрії небезпечних зон, динаміку гідрометеоумов та відсутність прямої комунікації між суднами. Проведено критичний аналіз наукових публікацій, присвячених алгоритмам ухилення в умовах багатосуднових конфліктів, підходам до оптимального керування, формуванню адаптивних стратегій маневрування, а також математичному моделюванню допустимих траєкторій. Виявлено, що наявні рішення здебільшого орієнтовані на умови відкритого моря, що не відповідає потребам вузьких портових акваторій, де додаткову складність створюють днопоглиблювальні механізми, шланги та якорні лінії. З урахуванням цього, в роботі запропоновано концепцію адаптивної навігаційної зони (ANZ), у вигляді динамічної еліпсоїдної оболонки навколо днопоглиблювального судна, параметри якої формуються на основі геометричних характеристик обладнання, його орієнтації у просторі та з урахуванням просторово-часової динаміки. Побудовано формальну модель адаптивної навігаційної зони із урахуванням параметрів безпечної відстані та змінної конфігурації перешкод, а також алгоритм оцінки ризику входу інших суден у цю зону. Розроблений підхід інтегрується в цифрові навігаційні системи нового покоління та підтримує динамічне перепланування маневрів у реальному часі. Обґрунтовано доцільність використання цифрових двійників (Digital Twin) портових акваторій для візуалізації ситуації, прогнозування ризиків та підтримки рішень. Наведено приклад ефективної реалізації підходу в умовах порту Роттердам, де використовується комплекс інструментів: VTS-координація, AIS-інтеграція, AR-дисплеї, V2V-протоколи та ALRS. Продемонстровано, що комбінація математичного моделювання ANZ із цифровими технологіями дає змогу не лише підвищити точність оцінки навігаційної ситуації, але й забезпечити взаємне узгодження дій суден у критичних умовах. Усі елементи системи є сумісними зі стандартом S-100 і можуть застосовуватись як в умовах традиційного керування, також у сценаріях напівавтономного судноводіння. Висновки статті акцентують на високому потенціалі розробленого підходу для зниження навігаційних ризиків, підвищення безпеки портових операцій та відповідності міжнародним стандартам морської безпеки. У перспективі передбачено вдосконалення моделі адаптивної навігаційної зони (ANZ) за допомогою нейронних мереж і глибокого навчання для підвищення точності прогнозування траєкторій та адаптації до непередбачуваної поведінки суден і днопоглиблювального обладнання.

Ключові слова: адаптивна навігаційна зона, безпека судноплавства, днопоглиблювальні судна, ландшафт морського дна, маневрування суден, морський транспорт, моделювання навігаційної зони, навігаційні перешкоди, оптимальне управління, прогнозування траєкторій, судноплавство, стиснені акваторії.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного функціонування світової логістичної системи. Зважаючи на високий рівень глобалізації, значну частину міжнародної торгівлі становлять вантажні перевезення морськими шляхами, які потребують гарантованого рівня безпеки, особливо у прибережних зонах

та портах. Одним із найкритичніших аспектів морського транспорту є забезпечення безпечного маневрування суден у складних умовах обмежених акваторій, де особливу загрозу становлять зони днопоглиблювальних робіт [1-4].

На фоні постійного зростання розмірів і осадки суден, підтримка навігаційних глибин у підхідних каналах та фарватерах стала регулярним технічним завданням. Водночас днопоглиблювальні судна, що виконують роботи з забезпечення навігаційних глибин та необхідного ландшафту морського дна, мають обмежену маневреність, часто займають частину суднового ходу і створюють динамічну навігаційну перешкоду [5-7]. Така ситуація суттєво ускладнює планування безпечного розходження та вимагає підвищеного рівня ситуаційної обізнаності екіпажів і операторів VTS.

У сучасному суднопластві не існує універсального рішення для точного прогнозування ризиків під час взаємодії з днопоглиблювальними суднами. Традиційні методи попередження зіткнень недостатньо враховують просторову змінність навігаційних перешкод [8, 9], вплив гідрометеорологічних чинників [10 11], а також відсутність прямої комунікації між суднами [12, 13]. Таким чином, виникає необхідність у формалізації навігаційних зон небезпеки та впровадженні цифрових технологій, що дозволяють динамічно оцінювати ситуацію в реальному часі.

Актуальність проблеми визначається потребою у комплексному підході до забезпечення безпеки судноплавства у присутності днопоглиблювального флоту [14, 15], включаючи розробку адаптивних математичних моделей навігаційної зони [16, 17], алгоритмів проактивного прогнозування траєкторій [18, 19], а також інтеграцію таких моделей у навігаційні системи наступного покоління. Такий підхід сприятиме зниженню ризику навігаційних інцидентів, підвищенню ефективності портових операцій та відповідатиме міжнародним вимогам з безпеки судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виникнення аварійних ситуацій зближення суден у стиснених водах здебільшого відбувається через некоректні, несвоєчасні і некваліфіковані дії з боку навігаційного офіцера і зрідка через технічну несправність суднової апаратури [20-22].

Проблематика забезпечення безпеки розходження суден у стиснених водах отримала значну увагу у вітчизняних та закордонних наукових публікаціях. Більшість досліджень зосереджено на аналізі аварійних ситуацій, що виникають через помилки у судноводінні [23-25], несвоєчасне прийняття рішень або відсутність належної координації між учасниками судноплавства [26-28]. Серед основних ризиків – несвоєчасне маневрування [29, 30], неправильно обрана швидкість або курс [31, 32], а також недостатнє урахування динаміки інших суден у зоні обмеженої маневреності [33, 34].

В наукових роботах пропонують комплекс дій для екстреного уникнення зіткнень, включаючи екстремальні маневри, реверсування, гальмування або віддачу якоря, а також комбінацію зазначених методів. У складних ситуаціях зближення суден, особливо в районах високої щільності трафіку, системах поділу руху або у припортових водах, навігаційні офіцери змушені здійснювати точні розрахунки та обирати маневри, що не лише відповідають вимогам МППЗС-72, а й враховують геометрію траєкторій зближення з кількома суднами.

Суттєвий внесок у розв'язанні завдань безпечного розходження зроблено в галузі математичного моделювання та оптимального управління [35-37]. Зокрема, використання теорії оптимального управління дозволяє будувати маневри уникнення за наявності кількох навігаційних перешкод. Алгоритми, що поєднують лінійне та нелінійне програмування, формують траєкторії руху, мінімізуючи ймовірність зіткнення та визначаючи допустимі зони маневрування навіть у складних умовах.

У випадках багатосуднових конфліктів (три і більше судна) запропоновано підхід з формуванням стратегій адаптивного маневрування – як пріоритетних, так і резервних – що дає змогу уникнути залежності від дій інших суден, які можуть виявитися непередбачуваними. Аналіз істинних та відносних траєкторій показує, що ефективне ухилення потребує врахування швидкісних параметрів об'єктів і, за певних умов, вимагає поетапного виконання маневрів.

Водночас встановлено важливість аналізу форми траєкторій для повернення судна до початкової траєкторії після виконання ухилення. Залежно від співвідношення швидкостей між судном та перешкодою, істинна і відносна траєкторії можуть суттєво різнитися, що впливає на вибір оптимального маневру. Інші дослідження (що враховують роботу всього пропульсивного комплексу [38-41]) також надають аналітичні умови для існування декількох допустимих стратегій розходження в складних сценаріях.

Проте більшість вищезгаданих досліджень орієнтовані на сценарії, що відбуваються у відкритому морі, де судна мають більший маневровий простір. У випадку обмежених акваторій таких як вузькості, канали або порти, питання безпечного маневрування набуває іншого характеру. При цьому провідну роль відіграють берегові диспетчерські служби, оператори VTS та лоцманські команди, що координують рух у режимі реального часу. Водночас у таких зонах часто присутні днопоглиблювальні судна, які є обмеженими в маневреності та створюють динамічні навігаційні перешкоди [42, 43].

Слід відзначити, що спеціалізовані дослідження, присвячені розходженню суден з днопоглиблювальними суднами, наразі є обмеженими. У науковій літературі практично відсутні комплексні моделі, що враховують динамічну геометрію зони днопоглиблювальних робіт, непередбачуваність їхньої конфігурації (враховуючи шланги, якорі, робочі механізми) та вплив зовнішніх чинників (вітру, течії) на параметри судового руху. Це створює значний науковий і практичний розрив, що вимагає розробки адаптивних навігаційних моделей, алгоритмів прогнозування конфліктних ситуацій та інтеграції цих інструментів у цифрові навігаційні системи нового покоління.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є розробка науково обґрунтованої концепції забезпечення безпеки судноплавства під час розходження з суднами, що виконують днопоглиблювальні роботи, шляхом математичного моделювання адаптивної навігаційної зони та впровадження інноваційних цифрових технологій для прогнозування та підтримки маневрування в умовах обмежених акваторій.

Виклад основного матеріалу. Функціонування сучасних морських портів в умовах зростаючої інтенсивності міжнародних вантажопотоків вимагає від адміністрацій та операторів забезпечення безперервного і безпечного судноплавства. З урахуванням збільшення габаритів суден, зокрема контейнеровозів і танкерів, підтримка достатніх глибин у фарватерах набуває критичного значення, що, своєю чергою, обумовлює системне виконання днопоглиблювальних робіт як постійної складової експлуатаційної діяльності портів. Присутність днопоглиблювальних суден, які за класифікацією міжнародних правил МПЗС-72 відносяться до категорії суден, обмежених у здатності маневрувати, створює низку навігаційних ризиків. Їх експлуатація у вузьких або складних ділянках фарватеру ускладнює маневрування інших суден, а формальні правила не завжди враховують специфіку взаємодії в умовах змінних зовнішніх факторів – течій, хвиль чи вітру, які впливають на динаміку розходження. Основні навігаційні ризики, спричинені присутністю днопоглиблювальних суден:

- 1) звуження судового ходу внаслідок розміщення робочого обладнання;
- 2) наявність шлангів, якірних ліній та інших механізмів, що виступають за габарити корпусу судна;
- 3) збурення водного потоку, яке впливає на траєкторії інших суден у зоні робіт;
- 4) обмежена або відсутня передача динамічної інформації про переміщення днопоглиблювального судна для інших учасників навігації.

У цьому контексті актуалізується потреба у впровадженні адаптивних моделей управління, здатних не лише враховувати геометричні параметри обладнання (наприклад, довжину шлангів чи зону якоріння), але й прогнозувати зміни навігаційної обстановки у режимі реального часу. Особливої актуальності набувають інтелектуальні системи прогнозування, цифрові двійники портової акваторії та V2V-комунікація (vehicle-to-vehicle) як засоби підвищення ситуаційної обізнаності й навігаційної безпеки.

Порт Роттердам, як один із найзавантаженіших морських хабів Європи, демонструє ефективні технологічні підходи до управління ризиками під час виконання днопоглиблювальних робіт в зоні Nieuwe Waterweg та у зоні Maasvlakte. Порт Роттердам є показовим прикладом ефективного трафік-менеджменту де реалізовано низку організаційних і технічних заходів:

- 1) використання VTS (системи управління рухом суден) для централізованої координації трафіку;
- 2) інтеграція AIS-даних (Automatic Identification System) у Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) з метою підвищення ситуаційної обізнаності;
- 3) візуальна та цифрова ідентифікація днопоглиблювальних суден згідно з міжнародними стандартами;
- 4) динамічне планування маршрутів інших суден із можливістю тимчасового обмеження доступу до зон виконання робіт.

Водночас, навіть у таких умовах спостерігається нестача проактивних технологій, здатних забезпечити адаптивне керування у складних ситуаціях багатооб'єктної взаємодії.

У відповідь на ці виклики пропонується модель адаптивної навігаційної зони (ANZ – Adaptive Navigation Zone), що математично описується як динамічна еліпсоїдна оболонка. Її межі формуються з урахуванням радіуса безпечного обходу, довжини шлангів і орієнтації обладнання, що дозволяє здійснювати просторову локалізацію потенційно небезпечної зони. Судна, які наближаються, можуть за допомогою вбудованого алгоритму перевіряти відстань до меж ANZ і, відповідно, будувати безпечну траєкторію маневру, враховуючи допустимий рівень ризику.

Адаптивна навігаційна зона (Adaptive Navigation Zone, ANZ), яка описується як еліпсоїдна оболонка, що динамічно змінюється залежно від розташування судна та конфігурації обладнання, як наведено на рис. 1.

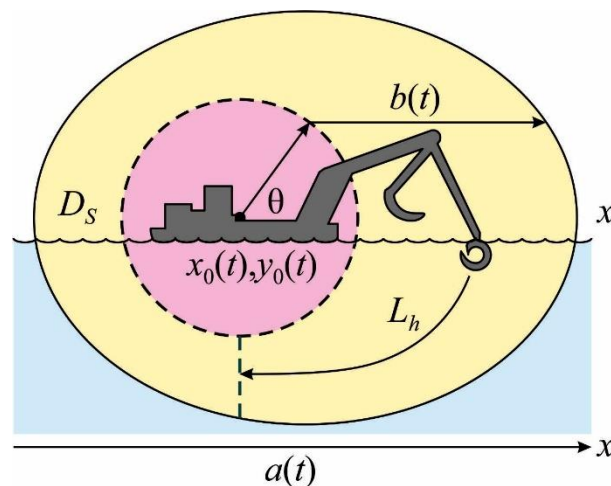


Рисунок 1 – Адаптивна навігаційна зона робота днопоглиблювального судна

Відповідно до моделі адаптивної навігаційної зони роботи днопоглиблювального судна, що надана на рис. 1:

D_s – базовий радіус безпечного обходу навколо судна;

L_h – ефективна довжина шлангів або якорних ліній, що виступають за корпус судна;

θ – кутова орієнтація обладнання відносно осі руху судна;

$x_0(t), y_0(t)$ – координати центру судна у момент часу t ;

$a(t), b(t)$ – півосі еліпса, що визначають форму зони.

Тоді множина точок, що описує адаптивну зону небезпеки, задається формулою:

$$\Omega(t) = \left\{ (x, y) \in R^2 \mid \left(\frac{x - x_0(t)}{a(t)} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0(t)}{b(t)} \right)^2 \leq 1 \right\};$$

де R – обшир, в якому існує небезпека під час розходження транспортного судна та судна, що виконує днопоглиблювальні роботи;

$a(t) = D_s + L_h \cdot \cos\theta$ – довша піввісь, орієнтована вздовж шлангів;

$b(t) = D_s + L_h \cdot \sin\theta$ – коротша піввісь, залежно від орієнтації обладнання.

Для кожного судна, що наближається, виконується оцінка мінімальної відстані $d_{min}(t)$ у межах прогнозованого вікна часу Δt :

$$d(t) \min \|r_1(t') - r_2(t')\|, \quad t' \in [t, t + \Delta t]_{min}$$

де $r_1(t'), r_2(t')$ – векторні траєкторії днопоглиблювального судна і транспортного судна, що наближається; Обов’язкові умови виконання для безпечного розходження, будуть за умов:

$$d(t) \geq d_{safe_{min}}$$

де d_{safe} – гранична безпечна відстань, яка гарантує уникнення критичної ситуації.

Якщо ця нерівність не виконується, запускається алгоритм перепланування маневру або автоматичного сповіщення VTS/AR-системи.

Запропонований підхід дозволяє реалізувати превентивне планування, яке враховує конфігурацію робочого обладнання, орієнтацію шлангів, просторово-часову динаміку руху суден та змінні зовнішні умови, як наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Використання адаптивної навігаційної зони в порту Роттердам

Для реалізації такого підходу необхідні високотехнологічні інструменти, здатні забезпечити точне моделювання та візуалізацію навігаційного середовища в режимі реального часу.

Однією з найперспективніших концепцій у цьому напрямку виступає використання цифрових двійників (Digital Twin) – віртуальних моделей портової інфраструктури, які працюють у режимі реального часу. Такі моделі забезпечують динамічну візуалізацію актуального положення суден, зон проведення робіт, прогнозів, сформованих на основі гідрометеоумов, а також конфігураційних змін днопоглиблювального обладнання. Зокрема, цифрові двійники дозволяють не лише

моніторити ситуацію, а й прогнозувати потенційні конфлікти траєкторій, що суттєво підвищує якість прийняття рішень у вузьких акваторіях.

Додаткову підтримку судноводію надають AR-системи (доповнена реальність), які виводять на AR-дисплеї містка проєкції зон ризику $\Omega(t)$, допустимих траєкторій руху та динамічних обмежень, що базуються на просторово-часовій оцінці навколишнього середовища. Таке візуальне доповнення забезпечує інтуїтивне орієнтування в складному середовищі без перевантаження інформаційного інтерфейсу, зберігаючи високий рівень ситуаційної обізнаності.

Особливу роль у підвищенні координації між суднами відіграє V2V-комунікація (vehicle-to-vehicle) у комбінації з ALRS (Automated Local Route Suggestions) – автоматизованою системою рекомендацій щодо маршруту. Судна, що входять у потенційно конфліктну зону, обмінюються сигналами про наміри, коригують свою швидкість та час входу до зони під контролем берегових служб (VTS), отримуючи при цьому об'єктивні рекомендації щодо оптимального маршруту. Такий підхід дозволяє реалізувати принцип взаємного узгодження маневрів у реальному часі, що є критично важливим у зонах обмеженого маневрування.

Всі перелічені технологічні компоненти інтегруються в сучасні навігаційні системи, зокрема в ECDIS (Electronic Chart Display and Information System), адаптовані до стандарту S-100, що забезпечує підтримку багатопланових картографічних даних, гнучке відображення об'єктів у динаміці та сумісність з інтелектуальними алгоритмами. Прогнозування траєкторій здійснюється на основі багатоджерельних даних, зокрема інформації з датчиків, результатів машинного навчання та розв'язання рівнянь руху з урахуванням гідродинамічних збурень, що дає змогу реалізувати адаптивне управління судном у реальному часі з можливістю попередження входу до критичних зон ще на етапі стратегічного планування.

Застосування цифрових двійників, AR-технологій, V2V-протоколів і ALRS у поєднанні з математичним моделюванням адаптивної навігаційної зони створює умови для розвитку напівавтономного або повністю автономного судноводіння, особливо в умовах інтенсивного портового трафіку та днопоглиблювальних операцій. Таким чином, впровадження вищезазначених інструментів формує нову систему ситуаційної підтримки прийняття рішень, де поєднуються аналітичні, цифрові та когнітивні компоненти для досягнення максимальної точності, узгодженості та безпеки судноплавства у складних навігаційних умовах.

Висновки. Забезпечення безпеки маневрування в умовах інтенсивного портового трафіку та присутності днопоглиблювального флоту є складним багатофакторним завданням, що вимагає системного підходу та впровадження інноваційних технологій. Аналіз сучасного стану морського транспорту вказує на відсутність універсальних рішень для прогнозування та уникнення навігаційних конфліктів у складних акваторіях, що обумовлює необхідність розробки нових підходів до моделювання траєкторій та формалізації зон ризику.

Запропонована в роботі концепція адаптивної навігаційної зони (ANZ), яка описується як динамічна еліпсоїдна оболонка навколо днопоглиблювального судна, враховує конфігурацію обладнання, його орієнтацію та просторові обмеження. Математична формалізація цієї зони дозволяє здійснювати оцінку мінімальної безпечної відстані в режимі реального часу та ініціювати автоматизовані маневрові рішення або попереджувальні дії у разі потенційного входу в небезпечну зону.

Ефективність підходу підкріплена прикладом порту Роттердам, де продемонстровано переваги використання інтегрованих навігаційних систем, VTS-координації, AR-інтерфейсів, V2V-комунікації та ALRS для динамічного управління потоками суден у зонах днопоглиблювальних робіт. Це свідчить про практичну реалізованість концепції в умовах інтенсивної взаємодії морських об'єктів.

Запропонована система ситуаційної підтримки рішень, яка поєднує адаптивне моделювання, цифрову візуалізацію та комунікаційні протоколи, формує основу для впровадження нового

покоління навігаційних технологій, орієнтованих на безпеку, ефективність та відповідність вимогам міжнародних стандартів.

Таким чином, результати дослідження мають не лише теоретичну цінність, а й практичну спрямованість, пропонуючи інструментарій для покращення управління судноплавством у складних умовах портової діяльності. Подальші дослідження доцільно зосередити на розширенні моделей ANZ з урахуванням непередбачуваної поведінки навігаційних об'єктів, підвищенні точності прогнозів за рахунок нейромережевих підходів та інтеграції з глобальними системами моніторингу і управління морським рухом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. Даки О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
3. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
4. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
5. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
6. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
7. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
8. Тимошук О.М., Даки О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
9. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії воднохвильових збурень // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pířtěk V., Kuřcera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
12. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
13. Бурмака І.А., Ворохобін І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.

14. Майданевич С.Б., Тимошук О.М. Суб'єкти та принципи міжнародного морського права // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
15. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
16. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
17. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
18. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.
19. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
21. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
22. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
23. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
24. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
25. Ворохобин И.И. Зависимость вероятности безопасного прохождения судном стесненного района от закона распределения погрешности смещения // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 30. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 58-66. DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
26. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
28. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
29. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
30. Сагін С.С., Ворохобин І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.

31. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
32. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
33. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
34. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
35. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
37. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.
38. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик судового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.
39. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
40. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
41. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.
42. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
43. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences Water transport. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // Water transport. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
3. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // Water transport. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.

4. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
5. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
6. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
7. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
8. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
9. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
10. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O. A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
11. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
12. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
13. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.31. – P.80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
14. Maydanevich S.B., Tymoshchuk O. Subjects and principles of the international maritime law // *Water transport*. – 2021. – Vol. 3(34). – P. 39-47. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.05.
15. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
16. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
18. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
19. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
20. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
21. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

22. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
23. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
24. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
25. Vorokhobin I. Impact of the cross-track error distribution law on safe navigation in narrow waters // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2020. – Vol.30. – P.58-66. doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.58-66.
26. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
27. Petrychenko O., Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
28. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
29. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
30. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.
31. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
32. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
33. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
34. Levynskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities*. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
35. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”* – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
37. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
38. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Use of integrated diagnostic models to assess the operational characteristics of a ship’s propulsion system // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
39. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // *Problems of technical*. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
40. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.

41. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // Ship power plants. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
42. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
43. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.

Sagin S.S., Sagin S.V.

ENSURING THE SAFETY OF NAVIGATION DURING ENCOUNTERS WITH VESSELS ENGAGED IN DREDGING OPERATIONS

An analysis was carried out on the specific features of organizing safe maneuvering of seagoing vessels in dredging operation zones. One of the key threats in such waters is identified as the limited maneuverability of dredging vessels, as well as the variable spatial configuration of navigational obstacles caused by the positioning of hoses, anchors, and equipment. It has been established that traditional approaches to collision avoidance and prediction fail to account for the variability of hazardous zone geometry, the dynamics of hydro-meteorological conditions, and the lack of direct communication between vessels. A critical review of scientific literature was conducted, focusing on avoidance algorithms in multi-vessel conflict scenarios, optimal control strategies, the development of adaptive maneuvering tactics, and mathematical modeling of feasible trajectories. It was revealed that most existing solutions are tailored to open-sea conditions, which do not meet the requirements of confined port waters, where dredging equipment, hoses, and anchor lines introduce additional complexity. In response to these challenges, the paper proposes the concept of an Adaptive Navigation Zone (ANZ), modeled as a dynamic ellipsoidal envelope around a dredging vessel. The parameters of this zone are formed based on the geometric characteristics of the onboard equipment, its spatial orientation, and spatio-temporal dynamics. A formal model of the adaptive navigation zone has been developed, incorporating safe distance criteria and dynamic obstacle configurations, along with an algorithm for assessing the risk of intrusion by other vessels. The proposed method is designed for integration into next-generation digital navigation systems and supports real-time maneuver re-planning. The feasibility of using Digital Twins of port areas is substantiated to visualize situational dynamics, forecast risks, and support decision-making. An example of effective implementation is presented using the case of the Port of Rotterdam, where a suite of tools is employed: VTS coordination, AIS integration, AR displays, V2V communication protocols, and ALRS. The study demonstrates that combining ANZ-based mathematical modeling with digital technologies not only improves the accuracy of navigational situational assessment but also ensures mutual coordination of vessel actions in high-risk scenarios. All system components are compatible with the S-100 standard and may be applied in both conventional navigation and semi-autonomous scenarios. The article's conclusions emphasize the high potential of the proposed approach to reduce navigational risks, enhance port operation safety, and comply with international maritime safety standards. Future work envisions the enhancement of the Adaptive Navigation Zone (ANZ) model using neural networks and deep learning to improve trajectory prediction accuracy and adapt to unpredictable behavior of vessels and dredging equipment.

Keywords: *adaptive navigation zone, compressed water areas, dredging vessels, maritime transport, navigation safety, navigation zone modeling, navigational obstacles, optimal control, seabed landscape, shipping, trajectory prediction, vessel maneuvering.*

Стаття прийнята 14.03.2025