

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ
НА ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ МАГІСТРАЛЯХ**

М.М. Масьонкова

Херсонська державна морська академія
20, Ушакова пр., Херсон, 73000, Україна
Email: masyonkova@gmail.com

Запропоновано метод автономної навігації для внутрішніх водних шляхів із притоками, спрямований на зниження ризику зіткнень суден у складних навігаційних умовах. Проаналізовано особливості маневрування суден у вузьких притоках, де невизначеність дій інших суден і складні гідродинамічні фактори значно підвищують аварійні ризики. Представлена методика поєднує цифрове моделювання річкового середовища, удосконалений алгоритм трасування маршруту, тривимірну динамічну модель руху судна, алгоритм ухвалення рішень відповідно до «Правил для уникнення зіткнень на внутрішніх річках» та належну морську практику. Вперше запропоновано фазову модель зближення суден для шляхів водних приток. Це забезпечило можливість відокремлювати безконфліктну та конфліктну фази взаємодії і своєчасно ініціювати маневр ухилення. Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованого підходу: алгоритм забезпечує своєчасне виявлення ризику, вибір оптимальної стратегії ухилення та збереження курсової стійкості судна. Практична значущість дослідження полягає у створенні основи для впровадження автономних систем підтримки прийняття рішень на внутрішніх водних шляхах, що може суттєво підвищити безпеку судноплавства в районах злиття річок.

Ключові слова: моделювання, інтелектуальні методи, притокові водні шляхи; автономне прийняття рішень, навігація, ідентифікація ризику зіткнення, уникнення зіткнень, ефективність

Вступ. Сучасний розвиток технологій автономного судноводіння відкриває нові горизонти для забезпечення безпеки та ефективності на внутрішніх водних шляхах. Зростання інтенсивності судноплавства на річках і каналах, зокрема у районах злиття основних русел та їхніх приток, супроводжується підвищенням ризиків аварійних ситуацій. Згідно зі статистичними даними, переважна більшість зіткнень на внутрішніх водах зумовлена людським фактором – помилками під час оцінювання навігаційної обстановки, неправильним тлумаченням правил плавання чи запізнілими маневрами ухилення [1]. З цієї перспективи автономні навігаційні системи розглядаються як перспективний інструмент для мінімізації впливу людських помилок та підвищення рівня безпеки судноплавства [2, 3]. Використання автономних рішень дає можливість своєчасно виявляти потенційні небезпеки та оперативно формувати рекомендації для екіпажу або безпосередньо для суднової автоматизованої системи управління. Такі системи здатні прогнозувати траєкторії руху цільових суден, оцінювати ступінь ризику зближення, визначати оптимальний момент для маневрування ухилення та пропонувати безпечні параметри руху – курс і швидкість [4]. Це надзвичайно важливо для судноплавства у вузьких та складних умовах притокових русел, де невизначеність дій інших учасників руху поєднується з природними та технічними обмеженнями: звуженням фарватером, обмеженою видимістю, підвищеним впливом течії та низькою маневровістю річкових суден [5].

Попри значні досягнення у сфері автономної навігації для морських і прибережних суден, питання безпечного руху у внутрішніх водних системах залишається недостатньо вивченим. Більшість існуючих підходів орієнтовані на відкриті

акваторії, де умови відносно передбачувані, а простір для маневра значно більший. Натомість притокові ділянки річок відзначаються високою динамічністю навігаційної ситуації: раптовою появою суден з обмеженою можливістю маневрування, складною геометрією фарватеру та необхідністю дотримання спеціальних регуляторних правил, що визначають пріоритети руху у місцях злиття [6, 7].

Актуальність даного дослідження зумовлена потребою у створенні спеціалізованих методів автономного управління судном саме в умовах внутрішніх притокових шляхів. Такі методи мають інтегрувати сучасні алгоритми оцінки ризику зіткнень, динамічні моделі руху суден, адаптивні методики трасування маршруту та чинні навігаційні правила. Лише комплексний підхід, що поєднує технічні, регуляторні та практичні аспекти, здатен забезпечити високу надійність системи автономної навігації та сприяти підвищенню рівня безпеки і ефективності внутрішнього судноплавства.

Огляд літератури. Останнім часом увагу наукової спільноти все частіше привертає проблема ефективності використання як простих, так і комбінованих індексів ризику, які оцінюють безпеку навігації суден. Такі індекси поєднують автоматичну ідентифікаційну систему (AIS) із візуальними або радарними джерелами та враховують специфіку вузьких і мілких акваторій. Так, у [8] автори запропонували методику робастної оцінки ризику з використанням ф'юзії AIS та зображення, що підвищило стійкість до пропусків/збоїв у даних і забезпечило покращення складних конфігурацій руху судна в каналах і на злиттях річок. Паралельно з технічним прогресом зростає увага до відповідності навігаційним правилам (міжнародним та національним/внутрішнім регламентам). Дотримання загальноприйнятих правил є ключовою вимогою для автономного управління судном, обмеження та логіки прийняття рішень [9]. Для внутрішніх водних шляхів актуальні також міжнародні навігаційні правила, які деталізують пріоритети в обмежених водах. Новітні дослідження у цій сфері пропонують формалізовані зони безпеки/дистанції та механізми ролей на зразок “дати дорогу/йти прямим курсом” [10]. Низка сучасних досліджень орієнтовані на оцінювання ризику навігації суден у внутрішніх водах, включно з вузькими каналами й ситуаціями перетину/злиття [4]. За 2023–2025 рр. з'явилися спеціальні огляди автономного судноплавства, які, зокрема, розглядають питаннями юридичної відповідальності, інтеграції з береговою інфраструктурою, стандартів датчиків і сертифікації [11]. Публікації з питань підвищення рівня морської безпеки та ефективного управління ризиками все частіше розглядають проблематику використання штучного інтелекту та його застосування у сфері прогностичного технічного обслуговування, навігації, аналізу ризиків, управління екіпажем та контролю небезпечних матеріалів демонструє значний потенціал для зниження загроз і оптимізації процесів [12, 13].

Однак фрагментарність наукових розробок у сфері автономного судноплавства на внутрішніх водних шляхах, недостатня інтеграція існуючих підходів до оцінки ризиків і управління безпекою навігації обумовлюють необхідність подальших комплексних досліджень інтелектуальних методів управління автономними суднами на внутрішніх водних магістралях.

Мета роботи. Метою даного дослідження є створення комплексного методу автономної навігації суден у внутрішніх водних шляхах з притоками, який здатен забезпечити безпечне та ефективне керування рухом у складних і динамічних умовах.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- розробити математичну модель оцінювання ризику зіткнень, яка враховує багатосуднові сценарії та специфіку вузьких фарватерів;
- інтегрувати динамічні моделі маневрових характеристик судна (з урахуванням ефектів мілководдя та обмеженості маневрування) у процес планування траєкторій;

- поєднати алгоритми прогнозування руху та ухвалення рішень з чинними міжнародними та національними правилами судноплавства;
- сформулювати стратегію адаптивного маневру ухилення, здатну своєчасно переходити від безконфліктної до конфліктної фази взаємодії суден і мінімізувати ризик аварійної ситуації;
- провести моделювання та імітаційні експерименти для перевірки ефективності та стійкості запропонованого методу в реалістичних умовах річкових злиттів.

Ключові проблеми та напрямки досліджень для автономної навігації на притокових шляхах. Специфічні особливості навігації у внутрішніх притоках ускладнюють дослідження автономної навігації на притокових шляхах. Ми визначили три ключові проблеми та напрями у цій сфері.

1. Відсутність методики оцінки ризику зіткнення, що враховує правила навігації.
2. Недостатній розвиток адаптивних методів оптимізації рішень.
3. Неврахування взаємодії динаміки маневру судна та довкілля.

Удосконалений метод автономної навігації для внутрішніх приток. У відповідь на ці виклики у роботі запропоновано удосконалений метод автономної навігації для внутрішніх приток. Він призначений для виявлення потенційних ризиків зіткнення та надання судноводію рекомендацій щодо того, коли і який саме маневр ухилення виконати. Метод базується на «Правилах щодо запобігання зіткненням на внутрішніх водних шляхах» та принципів належної морської практики [15]. На основі прогнозованої траєкторії цільового судна визначаються оптимальні принципи ухилення та момент для маневру відповідно до поточної ситуації зближення суден. Далі, поєднується маневрова математична модель руху судна та метод керування курсом із технікою трасування маршруту. На основі цієї консолідації формується модель ухвалення рішення щодо уникнення зіткнення, яка обирає оптимальну стратегію для кожної ситуації. Метод враховує маневрові характеристики судна і забезпечує дотримання правил «Правил для уникнення зіткнень на внутрішніх річках» та належної морської практики. Цей метод може бути використаний для автономної навігації у складних умовах внутрішніх притокових водних мереж.

Фази взаємодії двох суден. На основі аналізу динаміки зближення суден у вузьких внутрішніх водних шляхах ми виокремили дві фази взаємодії двох суден: фаза без конфлікту (нормального розходження) і фаза конфлікту (небезпечного зближення). У фазі без конфлікту обидва судна можуть вільно рухатися запланованим курсом без спеціальних маневрів ухилення, оскільки на цьому етапі відсутній ризик зіткнення. Коли система виявляє потенційний ризик, відбувається перехід до фази конфлікту. Цей момент ініціює початок маневру ухилення (точка А). Після того, як небезпека минає і ризик зіткнення зникає, фіксується завершення маневру ухилення (точка В). З цього моменту подальші екстрені маневри вже не потрібні (Рис. 1). Після точки В судно переходить у фазу відновлення курсу. Такий поділ процесу зближення на етапи допомагає чітко визначити критичні моменти для ухвалення рішень у сценаріях уникнення зіткнень на річці.



Рис. 1 Динаміка зближення суден та дії з запобігання їх зіткнення

Загальний підхід. Запропонована методологія передбачає виконання кількох етапів. Спочатку формується цифрова модель навігаційного середовища для внутрішньої водної системи з притоками. Навколишня обстановка (береги, межі фарватеру, рекомендований курс, роздільні смуги, якірні стоянки тощо) представлена у вигляді математичних об'єктів (точок, ліній, багатокутників), щоб судно могло «розуміти» межі і структуру водного шляху [16]. Непрямолінійний маршрут судна було розділено на серію коротких прямих відрізків – умовних прямокутних ділянок, кожна задана чотирма координатами вершин. Такий підхід до дискретизації фарватеру забезпечив опис кривого каналу набором прямолінійних відрізків та спростив розрахунки траєкторії судна. Серединою кожного прямого сегмента проходить рекомендований маршрут – ламана лінія, що з'єднує середини послідовних відрізків каналу. Цифрова модель водної ділянки з притоками створює основу для навігаційних обчислень і рішень.

Модель руху судна. При моделюванні руху судна було враховано тільки горизонтальні плоскі рухи – розкачку (свай), дрейф (знос) і поворот (ріса, або рискання). Вертикальні коливання (диферент, крен, килювання) не взято до уваги, оскільки вони мало впливають на маневрування у сенсі зіткнень. Для точного відтворення динаміки руху застосовано трьохступеневу модель з урахуванням сил опору води, вітру, течії та дії рушія і стерна. Рівняння руху судна у горизонтальній площині записано у вигляді системи (1) для трьох ступенів вільності (курсу, поздовжнього і поперечного руху):

$$\begin{cases} (m + m_x) \cdot \ddot{u} + (m + m_x) \cdot r \cdot v = X_H + X_P + X_R + X_E \\ (m + m_y) \cdot \ddot{v} - (m + m_y) \cdot u \cdot r = Y_H + Y_P + Y_R + X_E \\ (I_{zz} + J_{zz}) \cdot \ddot{r} = N_H + N_P + N_R + N_E \end{cases} \quad (1)$$

де m – маса судна, m_x та m_y – додаткова маса (коефіцієнти інерції води) відповідно по осі x (поздовжній) та y (поперечний), u , v , r – прискорення поступального руху (вперед u , бічного v) та кутове прискорення повороту r , X , Y , N – сили та моменти, що діють на корпус (H – гідродинамічні сили корпусу), гребний гвинт (P), стерно (R) та сили доквілля (E , зумовлені вітром, течією, мілководдям тощо). Таким чином, перше рівняння описує баланс сил уздовж курсу (тяга рушія та опір води), друге – поперечних сил (бічний дрейф і відповідні опори), а третє – баланс обертальних моментів навколо вертикальної осі судна. Окремо враховано роботу гребного гвинта: ефективна тяга гвинта T визначається з урахуванням коефіцієнта відбору потужності на гвинт t_p . В статті наводиться формула (2) для розрахунку тяги T та пов'язані залежності, які враховують характеристики гвинта і корпусу.

$$Y_P = (1 - t_p) T \quad (2)$$

Враховано емпіричні формули для коефіцієнтів, що відображають ефект мілководдя, індукованої течії за кормою та інших гідродинамічних факторів (формула (3)). Модель включає коригувальні коефіцієнти для врахування складних ефектів (мілководдя, потік води від гвинта до корпусу, відхил стерна тощо).

$$\begin{cases} f = k_t \beta_R \\ k_t = 0.00023(\gamma_A \cdot L / D_p) - 0.028 \\ \gamma_A = (B / d) \{1.3(1 - C_b) - 3.1 l_{cb}\} \\ l_{cb} = x_c / L \cdot 100 \\ \beta_R = \beta - l_R \frac{r}{V} \end{cases} \quad (3)$$

де β_R – кут дрейфу керма, B – ширина, d – осадка, L – довжина, D_p – діаметр гвинта, x_c – поздовжня координата центра плавучості; k_t – поправковий коефіцієнт тяги, γ_A – поправковий коефіцієнт індукованої швидкості обтікання корпусу, C_b – коефіцієнт повноти корпусу, l_{cb} – поздовжній центр плавучості), l_R – коефіцієнт кута дрейфу керма; r – кутова швидкість хитамиці навколо вертикальної осі, V – поздовжня швидкість.

Модель відстеження маршруту. Для забезпечення руху судна по заданому фарватеру використано покращений алгоритм наведення по лінії видимості (Line-of-Sight, LOS). У кожний момент обирається цільова точка маршруту попереду судна на деякій фіксованій відстані вздовж курсу (ця відстань – попереджувальна дистанція вздовж маршруту). Кут напрямку на цю цільову точку визначає бажаний курс ψ_{LOS} для судна. На рис. 2 статті схематично показано принцип LOS: поточна позиція судна проектується на рекомендований маршрут, від неї відкладається наперед задана відстань Δ вздовж маршруту – отримана точка і є ціллю для наведення.

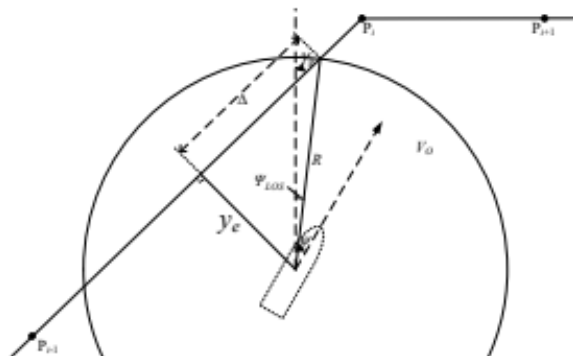


Рис. 2. Наведення по лінії видимості

Позначимо бічне відхилення судна від маршруту як $y_e(t)$, а курс самого маршруту в цій точці як γ_p . Тоді бажаний курс на цільову точку розраховують за формулою (4):

$$\psi_{LOS} \gamma_p - \tan^{-1} \left(\frac{y_e(t)}{\Delta} \right) \quad (4)$$

Носова частина судна спрямована у бік маршруту, пропорційно відхиленню y_e . Однак вибір надто великої Δ призводить до повільного повернення на курс, а надто малої – до перерегулювання. Зважаючи на значну інерцію та обмежену керованість річкових суден, запропоновано відмовитися використовувати адаптивне визначення попереджувальної дистанції залежно від величини відхилення. Введено функцію (5)–(6), яка збільшує Δ при великих відхиленнях і зменшує при малих, використовуючи згладжену косинусоїдальну залежність (це забезпечує швидке, але плавне повернення на курс без перерегулювання).

$$f(x) = \begin{cases} 0, x \leq x_{\min} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi(x - x_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} \right), x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1, x \geq x_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta = \Delta_{\min} + (\Delta_{\max} - \Delta_{\min})[1 - f(y_e(t))] \quad (6)$$

У результаті судно ефективно утримується на фарватері навіть за наявності збурень.

Модель оцінювання ризику зіткнення. У притокових водах судна можуть рухатися як по каналу (вздовж рекомендованого маршруту), так і поза фарватером (підходячи під різними кутами, наприклад, при виході з притоку). Пропонується класифікація інших суден за їхнім курсом: якщо курс іншого судна приблизно збігається з напрямком каналу, його вважають «тим, що слідує фарватером»; якщо інше судно йде під значним кутом або взагалі поза межами каналу, воно належить до «нефарватерних» об'єктів. На основі експертних оцінок (досвіду капітанів) встановлено граничне значення 5° для різниці курсу судна і напрямку каналу: якщо відхилення курсу іншого судна від осі каналу перевищує 5° , його вважають таким, що не дотримується фарватеру.

В залежності від категорії іншого судна, застосовуються різні методи прогнозування його траєкторії.

1. Для суден на фарватері: вважається, що вони до чергового повороту рухатимуться вздовж осі каналу, а в точці повороту здійнять маневр зміни курсу на наступний сегмент каналу.
2. Для суден поза фарватером: застосовується проєкція швидкісного вектора – проста інерційна модель, що припускає збереження поточних параметрів руху (курсу і швидкості). Такий метод (відомий як метод кінематичного прогнозування) обчислює майбутню позицію $P_{TS}(t_2|t_1)$ цільового судна в момент t_2 за його положенням $P_{TS}(t_1)$ на час t_1 , курсом C_{TS} та швидкістю v_{TS} .

Окремо розглядається перехідна зона на стику притоку і головного русла. В межах цієї зони (її вводять штучно у моделі) вважається, що судно, яке виходить з притоку, встигає завершити маневр повороту перед виходом до головного русла і входить у нього вже з постійним курсом (швидкість стабілізувалась). Від моменту перетину кордону зони злиття майбутня поведінка іншого судна оцінюється за його останнім курсом і швидкістю.

У цій зоні для іншого судна запропоновано спеціальну модель уникнення зіткнення: по-перше, вважається, що уникнення виконується тільки поворотом (без зміни швидкості в самій зоні злиття). Кут повороту фіксований (швидкість стала). Швидкість обчислюється на основі послідовних курсів судна, а подальша траєкторія прогнозується обчисленням нових компонента швидкості та координат. Така модель враховує плавний перехід маневру в притоку до руху в головному руслі, що підвищує точність оцінки ризику зіткнення і відповідає реальним практикам управління суднами.

Алгоритм ухвалення рішення про маневр ухилення базується на поєднанні навігаційних правил і динамічних моделей. Спочатку система на основі даних сенсорів виявляє конфлікт: об'єднує дані про рух власного судна, усіх цільових суден та навколишнього середовища, після чого за допомогою моделі прогнозу ідентифікує потенційні конфлікти протягом заданого горизонту часу. Далі, відповідно до «Правил для уникнення зіткнень на внутрішніх річках» і принципів уникнення зіткнень, система визначає роль власного судна у кожному конфлікті – поступається судно дорогою чи має право прямувати своїм курсом:

- якщо власне судно повинно дати дорогу, то воно негайно виконує необхідний маневр ухилення згідно з правилами (наприклад, зміну курсу або гальмування);
- якщо власне судно виступає як судно з переважним правом проходу, то воно контролює ситуацію: відстежує дії іншого судна і оцінює їхню достатність;
- якщо інше судно здійснює належний маневр вчасно і правильно, власне судно зберігає свій курс і швидкість (дотримуючись права руху прямим курсом);
- якщо дії іншого судна недостатні або запізнілі, власне судно зобов'язане втрутитися – виконати коригувальний маневр, щоб забезпечити розходження (зазвичай, дозволити іншому судну пройти поза доменом безпеки власного судна).

Реалізований алгоритм повністю відповідає чинним правилам судноплавства для внутрішніх водних шляхів Китаю. Зокрема, враховано Правило 15 «Правил для уникнення зіткнень на внутрішніх річках», яке спеціально регулює рух у місцях злиття річкового русла з притокою [11]. Це правило визначає пріоритети проходу для суден з основного русла і з притоку залежно від напрямків їх руху:

- якщо судно в головному руслі і судно з притоку рухаються в одному напрямку, то судно на головній річці зобов'язане дати дорогу судну, що виходить з притоки;
- якщо судна в руслі і притоку йдуть у зустрічних напрямках, то пріоритет визначається за течією: судно, що рухається проти течії (вгору за течією), повинно поступитися дорогою судну, що йде за течією (вниз).

У загальному випадку судно в притоку має перевагу при вході в основне русло, якщо обидва йдуть в одному напрямку, а судно, що йде вниз за течією, має перевагу перед тим, що йде вгору, при зустрічному курсі. Алгоритм ухвалення рішень використовує цю логіку для призначення ролей власне судно/інше судно у кожній конкретній ситуації зближення суден.

Аналіз ефективності. Поєднання динамічної моделі руху та методу повного перебору маневрів дає можливість успішно вирішувати завдання навігації в складних ситуаціях зустрічі суден. Метод забезпечує одночасно і ефективне уникнення зіткнення, і продовження плавання за курсом (операційна ефективність): судно не просто ухиляється, а робить це оптимально, не втрачаючи більше шляху, ніж потрібно.

Переваги та унікальність підходу. Розроблений метод демонструє цілісність підходу: він поєднав багато компонентів (цифрове середовище, правила плавання, динаміку судна, стратегія ухилення) у єдину систему. Алгоритм враховує формальні навігаційні правила і належну морську практику при виборі маневрів, а не оптимізує суто математичний критерій. Це наближає його до реального використання, оскільки гарантує, що запропоновані дії будуть зрозумілі й очікувані для живого капітана та інших учасників руху.

Висновки. У статті розроблено модель автономної навігації для внутрішніх водних шляхів із притоками шляхом об'єднання двох компонент: моделі уникнення зіткнень та моделі трасування маршруту з використанням математичного опису руху судна. Запропоновано методику, що забезпечує ефективну ідентифікацію ризику зіткнення та генерує конкретні рекомендації щодо маневру ухилення, пристосовані до маневрових характеристик судна.

Реалізовано динамічне відстеження змін: система постійно фіксує відхилення курсу та швидкості цільових суден, інтерпретує їхні наміри (наприклад, зрозуміти, чи інше судно планує повернути чи продовжує прямий шлях) і адаптивно переналаштовує власне рішення. Завдяки цьому кожна дія власного судна актуальна до поточної ситуації, а не до застарілої інформації. Усі маневри (зміни курсу і швидкості), які виконує система, прораховуються в єдиному інтегрованому контурі, що враховує обмеження навколишнього середовища (береги, глибини), дотримання правил

(регуляторні обмеження «Правил для уникнення зіткнень на внутрішніх річках») та можливості судна (максимальні кути повороту, прискорення тощо). Такий всеосяжний підхід забезпечує надійність і безпеку маневру навіть у багатосуднових сценаріях у складній обстановці.

Практична значущість роботи полягає в тому, що вперше детально опрацьовано автономну навігацію саме для вузьких внутрішніх притокових шляхів – сфери, що раніше отримувала менше уваги дослідників. Метод потенційно може бути впроваджений у системи підтримки рішення для екіпажів річкових суден або безпосередньо в автономні судна, підвищуючи безпеку на небезпечних ділянках. У подальшому планується розширити модель динаміки, включивши ефекти мілководдя, близькості берегів та взаємодії суден між собою, щоби підвищити адекватність симуляції реальних умов.

Список літератури

1. Dong C., Guo X., Gong Y. Research on Coupling Mechanisms of Risk Factors for Collision Accidents Between Merchant Ships and Fishing Vessels Based on the N-K Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025. V.13(3). P. 466. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse13030466>
2. Durlík I., Miller, T. Kostecka, E. Kozłowska, Ślaczka W. Enhancing Safety in Autonomous Maritime Transportation Systems with Real-Time AI Agents. *Applied Sciences*. 2025. V. 15(9). P. 4986. URL: <https://doi.org/10.3390/app15094986>
3. Liu C., Mao W., Liu J., & Chu, X. (). Intelligent Ships and Waterways: Design, Operation and Advanced Technology. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. V.12(9), P. 1614. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12091614>
4. Alamoush A.S., Ölçer A.I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025. V.13(1), P. 122. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse13010122>
5. Масьонкова М. М. Інтелектуальна система аналізу ризиків для підтримки прийняття рішень при евакуації корабля. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2025. Том 15, №2. С. 107–114. <https://doi.org/10.15276/imms.v15.no1.107>
6. Carvalho D.M., Dias J.M., de Abreu J.F. Sensing in Inland Waters to Promote Safe Navigation: A Case Study in the Aveiro's Lagoon. *Sensors*. 2024. Vol. 24(23). P. 7677. URL: <https://doi.org/10.3390/s24237677>
7. Huang L., Chen J., Xu L., Li H., Hao G., He Y. Research on Decision-Making Methods for Autonomous Navigation in Inland Tributary Waterways. *Applied Sciences*. 2025. V.15(7). P. 3823. URL: <https://doi.org/10.3390/app15073823>
8. Zhang H., Cao Y., Shan Q., Sun Y. Collision Avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships Based on Model Predictive Control Using Intention Data and Quaternions Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*, V. 202513, 124. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse13010124>
9. Ding H., Weng J. A robust assessment of inland waterway collision risk based on AIS and visual data fusion. *Ocean Engineering*. 2024. V.2024307. P. 118242. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118242>
10. Hannaford E., Maes P., Van Hassel E. (). Autonomous ships and the collision avoidance regulations: a licensed deck officer survey. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2022. V.21. P.233–266. URL: <https://doi.org/10.1007/s13437-022-00269-z>
11. Potočník, P. (). Model Predictive Control for Autonomous Ship Navigation with COLREG Compliance and Chart-Based Path Planning. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. V.13. P. 1246. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse13071246>

12. Durlík I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*. 2024. V.14(18). P.8420. URL: <https://doi.org/10.3390/app14188420>
13. Pang Y., Huang T., Wang Q. AI and Data-Driven Advancements in Industry 4.0. *Sensors*. 2025. V.25(7). P. 2249. URL: <https://doi.org/10.3390/s25072249>
14. Regulations of the People's Republic of China on Administration of Traffic Safety in Inland Waters. 2025. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/chn149783.pdf>
15. Understanding on Common Shipping OECD Legal Instruments Principles. OECD. 2025. URL: <https://legalinstruments.oecd.org/public/doc/165/165.en.pdf>
16. Miličević M., Vujović I., Petković M., Kuzmanić-Skelin A. Toward an Augmented Reality Representation of Collision Risks in Harbors. *Applied Sciences*. 2025. V.15, P.9260. URL: <https://doi.org/10.3390/app15179260>

INTELLIGENT METHOD OF CONTROLLING AUTONOMOUS VESSELS ON TRIBUTARY WATERWAYS

M. Masonkova

Kherson State Maritime Academy
20, Ushakov ave., Kherson, 73000, Ukraine
Email: masyonkova@gmail.com

The article proposes a method of autonomous navigation for inland waterways with tributaries, aimed at reducing the risk of vessel collisions under complex navigation conditions. The peculiarities of vessel maneuvering in narrow tributaries are analyzed, where the uncertainty of other vessels' actions and complex hydrodynamic factors significantly increase accident risks. The presented methodology combines digital modeling of the river environment, an advanced route-tracing algorithm, a three-dimensional dynamic model of vessel motion, a decision-making algorithm based on the "Inland Waterways Collision Avoidance Rules" and good seamanship practice. For the first time, a phase model of vessel encounter for tributary waterways is proposed. This made it possible to distinguish between conflict-free and conflict phases of interaction and to timely initiate an avoidance maneuver. Simulation results confirmed the effectiveness of the proposed approach: the algorithm ensures timely risk detection, optimal avoidance strategy selection, and preservation of vessel course stability. The practical significance of the study lies in establishing a foundation for the implementation of autonomous decision-support systems on inland waterways, which can substantially improve navigation safety in river confluence areas.

Keywords: modeling, intelligent methods, tributary waterways, autonomous decision-making, navigation, collision risk identification, collision avoidance, efficiency.