

*Давидов В.С., Доронін В.В., Спіян О.М., Алсйніков М.В.*

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНТЕЙНЕРОВИЗІВ НА ЦИРКУЛЯЦІЇ В МІЛКОВОДНИХ РАЙОНАХ

*Пріоритетним завданням при плаванні великогабаритних суден є забезпечення навігаційної безпеки плавання в мілководних районах прибережної зони при здійсненні циркуляції. У статті сформульовано об'єктивні причини, що впливають на безпеку плавання великогабаритних контейнеровозів на циркуляції в мілководних районах прибережної зони, які ведуть до збільшення аварійних морських пригод, пов'язаних з посадками на мілину і торканням ґрунту, навалами на гідротехнічні споруди та інші судна.*

*Проведений аналіз виявив недостатній комплексний підхід до спільного обліку конструктивних, морехідних, гідрометеорологічних та гідрологічних факторів і їх впливу на управління великогабаритними суднами та переміщення їх по запланованій безпечній траєкторії руху. Досліджено питання гідродинамічної взаємодії судна та ґрунту, експлуатаційної стійкості судна на курсі, зміни параметрів циркуляції на мілководді.*

*Проаналізовано математичні залежності, за допомогою яких можна розрахувати окремі безпечні параметри плавання на мілководді у вигляді глибин, швидкостей, зміни радіусів циркуляції. Виявлено практично недосліджені фактори, які впливають на безпеку плавання великогабаритних контейнеровозів на циркуляції в мілководних районах прибережної зони.*

*Зроблено висновок, що використання діючих методів з метою забезпечення безпеки плавання на мілководді є вагомим засобом, але не охоплює всього комплексу заходів безпеки, які необхідно застосовувати для утримання судна на запланованій траєкторії руху. Перелік різнорідних факторів, що впливають на безпеку плавання великогабаритних суден, наведених в аналізі останніх досліджень і публікацій у цій статті, вимагає проведення подальших досліджень для їх комплексного обліку при плаванні у мілководних районах прибережної зони.*

**Ключові слова:** безпека плавання, великогабаритний контейнеровоз, циркуляція, мілководдя, штучний інтелект.

**Постановка проблеми.** Результати аналізу посадок на мілину і торкання ґрунту, навалів на гідротехнічні споруди та інші судна великогабаритних контейнеровозів в мілководних районах прибережної зони, існуючих прибережних і портових систем безпеки руху суден дозволяють зробити висновок про те, що існуючі методи і способи управління на циркуляції в мілководних районах не в повній мірі вирішують завдання безпечного плавання, насамперед великогабаритних суден.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** з даної тематики в друкованих виданнях і в інтернет ресурсах виявив недостатньо комплексний підхід до спільного обліку конструктивних, морехідних, гідрометеорологічних та гідрологічних факторів і їх впливу на управління великогабаритними суднами та переміщення їх по запланованій безпечній траєкторії руху. У фундаментальних наукових працях досить повно досліджено питання гідродинамічної взаємодії судна та ґрунту, експлуатаційної стійкості судна на курсі, зміни параметрів циркуляції на мілководді. У підручниках та навчальних посібниках наведені математичні залежності, за допомогою яких можна розрахувати окремі безпечні параметри плавання на мілководді у вигляді глибин, швидкостей, зміни радіусів циркуляції. В останніх наукових роботах з цієї тематики [1,2] представлені математичні моделі руху судна на мілководді, у тому числі при змінній глибині.

Водночас залишаються практично недослідженими такі фактори, як:

- вплив на параметри циркуляції сумарного зносу від течій і вітрів при складному рельєфі дна на мілководді і біля берегової межі, які часом у рази збільшують їх вектори швидкостей;

- відхилення фактичної траєкторії руху судна на циркуляції від запланованої за рахунок зміни посадки великогабаритних суден в умовах зміни ефективності керма і гвинтів при їх частковій імерсії (зануренні) при диференті на ніс або руху в баласті, коли судно найбільш схильне до впливу вітру через збільшення його парусності;

- вплив відхилення вектору сили від накопиченого діючого моменту інерції за рахунок підвищеної швидкості від курсу судна, яке може досягати при різких поворотах  $30^\circ - 40^\circ$ , що призводить до дрейфу судна в протилежний бік від траєкторії циркуляції;

- визначення оптимальних швидкостей великогабаритних суден, що мають велику парусність, при плаванні по каналах і фарватерах, що дозволяють дотримуватися керованості суден для утримання їх на осі судового ходу або лінії провідних створів, з урахуванням існуючих обмежень з експлуатації СЕУ на мінімальних режимах роботи та підрулюючих пристроїв.

Вимагають опрацювання та закріплення в системах управління безпекою (СУБ) портів обов'язкові схеми буксирного забезпечення великогабаритних суден залежно від їх габаритів, конструктивних та морехідних якостей, стану в вантажі або баласті, фактичних та прогнозованих гідрометеоумов і течій незалежно від рівня підготовки та досвіду капітанів і лоцманів.

**Мета статті.** Провести аналіз проблем, пов'язаних з посадками на мілину та торканнями ґрунту великогабаритних суден при керуванні ними на циркуляції в мілководних районах, існуючих методів і способів обліку циркуляції в умовах обмежень по глибині та простору для маневру. Розробити пропозиції щодо застосування в штурманській практиці найбільш оптимальної схеми обліку циркуляції на мілководді.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Великогабаритні контейнеровозні судна, що практично не мають обмежень при плаванні у відкритому морі на великих глибинах у будь-яких погодних умовах, при виході на мілководдя прибережної зони та у складних, обумовлених навігаційною обстановкою, умовах стають найбільш уразливими для впливу зовнішніх факторів. Сформована протягом останніх 20 років суднобудівна політика з будівництва великогабаритних суден як найбільш економічних і зростаюча аварійність цих суден [3] вимагає виділення суден довжиною більше 300 м та осадкою близько 15 м і більше в особливу групу суден, для яких необхідне комплексне вирішення завдань забезпечення навігаційної безпеки плавання.

У даний час у світі побудовано понад 20 000 контейнеровозів (рис. 1). За 14 років (2006–2020) побудовано тільки великогабаритних суден більше 400 од. з наступними характеристиками:  $L = 397-400$  м,  $B = 56-59$  м,  $H =$  до 15.5 м,  $DWT$  до 199500 т, кількість контейнерів – 13000 – 23964 од. У липні 2021 р. введено в експлуатацію найбільший у світі контейнеровоз “Ever Ace”, побудований на південнокорейській верфі, якій має

наступні характеристики:  $L = 400$  м,  $B = 62$  м,  $H = 15,5$  м,  $h = 73$  м,  $DWT = 224999$  т, кількість контейнерів – 23992 од. [4].

Випереджаюче зростання габаритів великотоннажних суден у порівнянні з ростом портових акваторій і фарватерів створює певні труднощі в експлуатації великотоннажного флоту. 50% усіх АМП сталися на мілководді акваторій портів та рейдах, 10% – при проходженні шлюзів, 18% – у річках і каналах, 14% – у протоках і 8% – у відкритому морі [5]. На мілководді через виникнення гідродинамічної взаємодії судна з рельєфом дна, в порівнянні з глибокою водою: різко погіршується експлуатаційна стійкість судна на курсі, підвищується ризик, погіршується його маневреність, збільшується радіус циркуляції при однакових кутах перекладки керма і знижується швидкість на циркуляції. У середньому на великотоннажних морських суднах під час циркуляції з кермом, перекладеним на борт при повороті на  $90^\circ$ , швидкість знижується на  $1/3$ , а при повороті на  $180^\circ$  – удвічі [6].

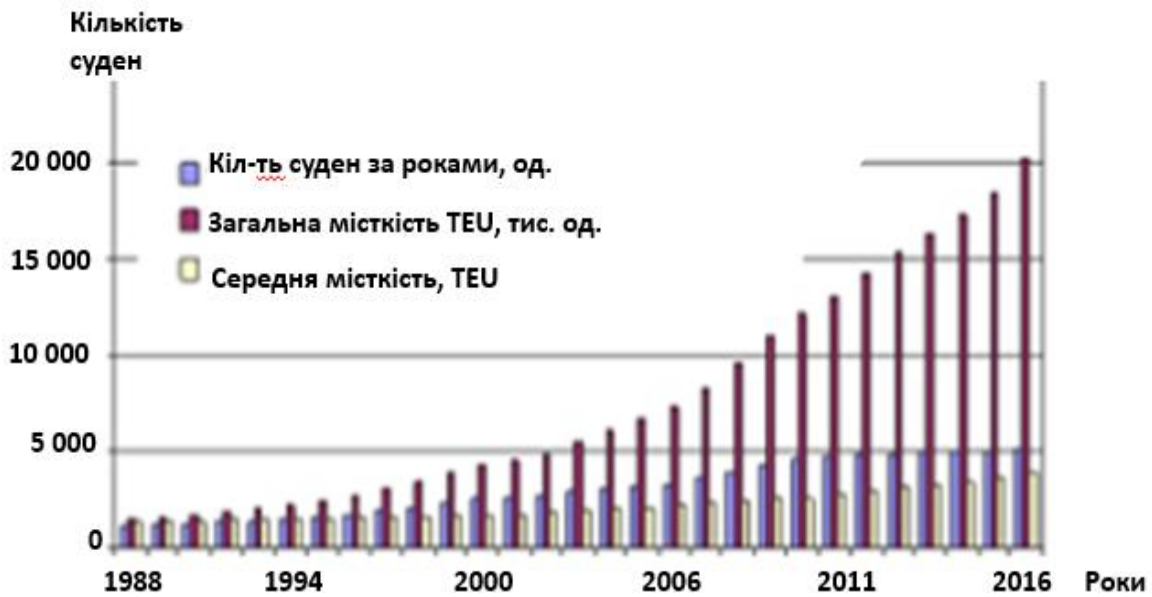


Рисунок 1 – Динаміка зростання контейнерного флоту з 1988 по 2016 рік.

Вплив мілководдя на поведінку судна залежить від глибини моря, габаритів судна та його швидкості. Вплив мілководдя на керованість суден починає позначатися при співвідношенні глибини під кілем ( $H$ ) до осадки судна ( $d$ )  $H/d < 4:6$  і може розраховуватися за формулою (1) [6].

$$H_{гл} < 4d + 3V^2c/g \quad (1)$$

де  $H_{гл}$  – глибина, м;

$d$  – середня осадка судна, м;

$V_c$  – швидкість судна, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння.

На всіх суднах при проведенні ходових випробувань визначаються маневрені характеристики судна, як правило, на головному судні цієї серії, які потім поширюються на всі судна цієї серії. Елементи поворотності судна визначаються при знаходженні судна у вантажі та баласті у спеціальних полігонах на глибокій воді для кількох кутів перекладки керма. Вони представлені для практичного використання на ходовому містку

в графічному та табличному вигляді. Одним з найважливіших моментів планування в стислих водах є розрахунок і планування поворотів з урахуванням циркуляції. За початок циркуляції приймається момент початку перекидання керма. Циркуляція характеризується лінійною та кутовою швидкостями, радіусом кривизни та кутом дрейфу, які не залишаються незмінними. Радіус циркуляції на мілководді, що залежить від співвідношення осадки і глибини моря, можна оцінити за формулою А. Гофмана (2) [6].

$$R_{уст}^M = \frac{R_{уст}}{1 + 0,1d/H - 0,71(d/H)^2}, \quad (2)$$

де  $R_{уст}^M$  – радіус циркуляції на мілководді;

$R_{уст}$  – радіус циркуляції на глибині;

$d$  – осадка судна;

$H$  – глибина моря.

Наведена формула є приблизною і не враховує кут перекидання керма, тому її не доцільно використовувати при плаванні на мілководді. У постійно змінюваних експлуатаційних умовах (завантаження судна, його осадка, глибина під кілем) точне маневрування стає надзвичайно складним. Судноводій не має інструментарію, за допомогою якого він міг би визначити, наприклад, на якій траєкторії виявиться судно при повороті на новий курс при конкретному куті перекидання керма в умовах мілководдя. Інформація про маневрені елементи, передбачена Резолюцією ІМО А.601(15), яка представлена в більшості випадків лише однією циркуляцією на глибокій воді. Як правило, цими параметрами поворотності судна, визначеними на глибокій воді, за відсутності інших, і використовуються при розрахунку точки перекидання керма і радіусу циркуляції на мілководді. Саме такий спрощений підхід до обліку параметрів циркуляції на мілководді і є однією з помилок штурманів при плануванні плавання на мілководді, що за відсутності комплексного обліку інших факторів і призводить до АМП [7,8]. У цьому плані заслуговують на увагу та доцільні до застосування на інших суднах універсальні методи з розрахунку 2-х основних параметрів циркуляції, які розроблені Драчовим В.М за результатами математичного моделювання, і даних, отриманих під час натурних випробувань суден на глибокій воді [2]. Це метод розрахунку точки перекидання керма на мілководді і метод побудови проміжних циркуляцій на мілководді.

Сутність методу розрахунку точки перекидання керма при плаванні на мілководді полягає у розрахунку попередження на мілководді, що розраховується за формулою (3) за допомогою розрахованого середнього коефіцієнта  $K$ , універсального для всіх типів суден. Коефіцієнт  $K$  розраховується щодо попередження на глибокій воді шляхом математичного моделювання.

$$S_M = S_{ГЛ} \cdot K = S_{ГЛ} \cdot [1 + (d/H_M) - 0,2], \quad (3)$$

де  $S_M$  – попередження на мілководді, м;

$S_{ГЛ}$  – попередження на глибокій воді, м;

$d$  – осадка судна, м;

$H_M$  – глибина мілководдя від поверхні води, м.

Математичне моделювання проводилося за 980 вимірними попередженнями для 7 різних глибин у діапазоні 31,2-120 м, яке для кутів перекидання руля в  $20^\circ$  і  $35^\circ$  було перевірено у процесі натурних випробувань для моделей 2-х типів суден – балкера та

танкера, які підтвердили добру збіжність результатів та достовірність математичного моделювання. Для оцінки можливості застосування середніх значень коефіцієнта для інших типів суден автором було проведено математичне моделювання для інших кутів перекладання керма. Для вибору коефіцієнта (К) запропоновано універсальний для всіх типів суден графік залежності середнього коефіцієнта від кута перекладки керма (рис.2).



Рисунок 2 – Графік залежності середнього коефіцієнта від кута перекладки керма для розрахунку циркуляції на мілководді

На підставі отриманої логарифмічної залежності середнього коефіцієнта від кута перекладки керма, якій враховує співвідношення осадки та глибини моря, стає можливим побудувати проміжні циркуляції (рис. 4), які забезпечать планування поворотів на мілководді при виконанні попередньої прокладки на великомасштабній карті (рис. 3) та здійснювати безпечні циркуляції.

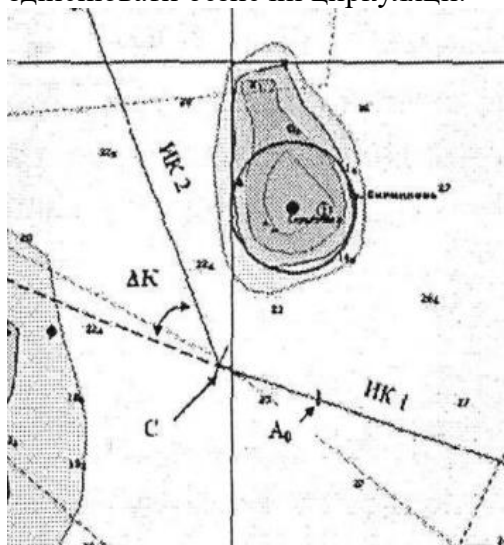


Рисунок 3 – Попереджувальна точка  $A_0$  початку циркуляції на карті

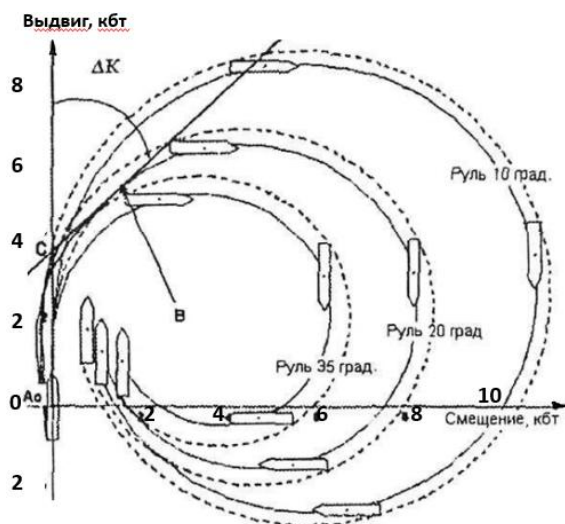


Рисунок 4 – Знаходження попереджувальної точки  $A_0$  початку повороту на діаграмі циркуляції

Використання методу побудови проміжних циркуляцій на мілководді із застосуванням отриманих середніх коефіцієнтів дозволяє замінити ними визначення

параметрів циркуляції в спеціальних мілководних полігонах, які тривали за часом і небезпечні для великогабаритних суден.

При плаванні судна в мілководних обмежених умовах доцільно для прискорення розрахунків використовувати спосіб розрахунку повороту судна з використанням дотичних до кривих циркуляції (метод дотичних). Розглянемо практичну реалізацію цього методу. На рис. 3 показано ділянку морської карти з попередньою прокладкою, де судну необхідно виконати поворот праворуч з К1 на К2 шляхом перекладки керма на  $20^\circ$ . Суть пропонованого способу полягає в тому, щоб до дуги циркуляції для призначеного кута перекладки керма провести дотичну під кутом, рівним куту повороту на новий курс, і продовжити її до перетину з лінією початкового курсу (т.С). Точка торкання з дугою циркуляції (т. В) є точкою, у якій судно виходить на новий курс. Отримана відстань  $A_0C$ , знята з діаграми циркуляції, у масштабі карти відкладається від т. С (точки зміни курсу) у напрямку, зворотному руху судна. Отримана на карті на початковому курсі К1 т. А<sub>0</sub> визначатиме місце початку перекладки керма на кут  $20^\circ$ .

Отриманий у результаті графічних побудов відрізок  $A_0C$  є відстанню попередження. Таким чином, пропонований метод дотичних дозволяє швидко визначити та нанести на карту точку початку перекладки керма та забезпечити точне виведення судна на новий курс. Доцільно включити графіки проміжних циркуляцій у робочі таблиці штурмана на ходовому містку для всіх типів суден з метою їх практичного використання при плаванні на мілководді.

**Висновки.** Використання розглянутих методів з метою забезпечення безпеки плавання на мілководді є вагомим засобом, але не охоплює всього комплексу заходів безпеки, які необхідно застосовувати для утримання судна на запланованій траєкторії руху.

Перелік різномірних факторів, що впливають на безпеку плавання великогабаритних суден, наведених в аналізі останніх досліджень і публікацій у цей статті, вимагає проведення подальших досліджень для комплексного обліку їх результатів при плаванні у мілководних районах прибережної зони.

Як показує аналіз аварійності, комплексний облік великої кількості різномірних факторів в умовах управління суднами з надзвичайно великою інерційністю та вітрильністю можливий лише з використанням штучного інтелекту. Так, високий рівень знань та практичної підготовки капітанів та лоцманів великогабаритних суден не завжди дозволяє у короткі проміжки часу одночасно проаналізувати великий обсяг різномірної інформації та прийняти єдине правильне рішення. Достатня різка зміна клімату на планеті, яка веде до посилення вітрів та штормів, ще більшою мірою посилює актуальність проблеми безпеки мореплавання в мілководних районах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Абдуллаева З.М. Разработка и реализация математических моделей движения судна на мелководье при переменной глубине. Автореферат диссертации. Дагестанский ГТУ-2017, 23с. [Електронний ресурс]– Режим доступу до ресурсу: <http://dstu.ru> > fileadmin > Avtoreferat\_Abdullaeva.
2. Драчев В.Н. Учет циркуляции при плавании в стесненных районах. Монография. [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу:<http://www.window.edu.ru>>catalog, 104с.
3. Развитие и структура флота контейнеровозов. [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу:[proship.ooo/article/478/](http://proship.ooo/article/478/).
4. Найбільший контейнеровоз від Evergreen прибув у порт. [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: <https://ua.sudohodstvo.org>.
5. Богомья В.И., Давыдов В.С., Кожухаренко Р.В. Анализ некоторых эксплуатационных свойств современных крупнотоннажных судов, методов и систем их

обеспечения при плавании в стесненных условиях. К.-КГАВТ, Водный транспорт, Вып.3(21), 2014, С.23-31.

6. Ганнесен В. Плавание на мелководье и в узкости. Учебное пособие для судоводителей. [Электронный ресурс].– Режим доступа до ресурсу: <http://www.pilotservice.narod.ru/masters/shalw/shalw.htm>.

7. Сергиенко В. В ловушке аварийности. Морские вести №12-2020. [Электронный ресурс].– Режим доступа до ресурсу: <http://www.morvesti.ru>

8. ANNUAL OVERVIEW OF MARINE CASUALTIES AND INCIDENTS. // European Maritime Safety Agency, 2019, С. 21.

9. Богом'я В.І., Давидов В.С., Доронін В.В., Пашков Д.П., Тихонов І.В. Навігаційне забезпечення управління рухом суден. Навчальний посібник. К.: ДВВП «Компас», 2012, 336 с.

10. Тюленев К.Г. Управление контейнерными перевозками во внешнеэкономической деятельности.-СПб.:ИПТ РАН, 2017, 112с.

## REFERENCES

1. Abdullayeva Z.M. Razrabotka i realizatsiya matematicheskikh modeley dvizheniya sudna na melkovod'ye pri peremennoy glubine. Avtoreferat dissertatsii. Dagestanskiy GTU-2017, 23s. [Yelektronniy resurs]– Rezhim dostupu do resursu: <http://dstu.ru> > fileadmin > Avtoreferat\_Abdullaeva.

2. Drachev V.N. Uchet tsirkulyatsii pri plavanii v stesnennykh rayonakh. Monografiya. [Yelektronniy resurs].– Rezhim dostupu do resursu: <http://www.window.edu.ru>>catalog, 104с.

3. Razvytye y struktura flota konteynerovozov. [Elektronnyy resurs].– Rezhym dostupu do resursu:[proship.ooo/article/478/](http://proship.ooo/article/478/).

4. Naybil'shyy konteynerovoz vid Evergreen prybuв v port. [Elektronnyy resurs].– Rezhym dostupu do resursu: <https://ua.sudohodstvo.org>.

5. Bogom'ya V.I., Davydov V.S., Kozhukharenko R.V. Analiz nekotorykh ekspluatatsionnykh svoystv sovremennykh krupnotonnazhnykh sudov, metodov i sistem ikh obespecheniya pri plavanii v stesnennykh usloviyakh. К.-КГАВТ, Vodniy transport, Vyp.3(21), 2014, S.23-31.

6. Gannesen V. Plavaniye na melkovod'ye i v uzkosti. Uchebnoye posobiye dlya sudovoditeley. [Yelektronniy resurs].– Rezhim dostupu do resursu: <http://www.pilotservice.narod.ru/masters/shalw/shalw.htm>.

7. Sergiyenko V. V lovushke avariynosti. Morskiye vesti №12-2020. [Yelektronniy resurs].– Rezhim dostupu do resursu: <http://www.morvesti.ru>.

8. ANNUAL OVERVIEW OF MARINE CASUALTIES AND INCIDENTS. // European Maritime Safety Agency, 2019, С. 21.

9. Bohom'ya V.I., Davydov V.S., Doronin V.V., Pashkov D.P., Tykhonov I.V. Navihatsiyne zabezpechennya upravlinnya rukhom suden. Navchal'nyy posibnyk. К.: DVVP «Kompas»,2012, 336 s.

10. Tyulenev K.G. Upravleniye konteynernymi perevozkami vo vneshneekonomicheskoy deyatel'nosti.-SPb.:IPT RAN, 2017, 112s.

**Davydov V., Doronin V., Spiian O., Alieinikov M.**

### **AN INTEGRATED APPROACH TO ENSURING NAVIGATIONAL SAFETY OF LARGE-SIZED CONTAINER SHIPS IN CIRCULATION IN SHALLOW WATER AREAS**

*The main task during navigation of big-size vessels is to ensure navigational safety in shallow water areas of waterside during turning. In the article objective reasons that influence on the safety of navigation of big-size carriers during turning in shallow water areas of water side*

*which lead to increase of maritime accidents involving stranding and touching the ground, raids on hydraulic structures and vessels.*

*The analysis conducted revealed insufficient integrated approach to joint accounting of structural, maritime, hydrometeorological and hydrological factors and their impact on the management of big-size vessels and their movement along the planned safe trajectory. The question of hydrodynamic interaction of the vessel and the soil, operational stability of the vessel on the course, change of the parameters of turning in shallow water have been studied.*

*Mathematical dependences with the help of which it is possible to calculate some safe parameters of navigation in shallow water in the form of depths, speeds, changes of turning radius are analysed. Practically unexplored factors which influence the safety of navigation of big-size container carriers in turning in shallow areas of the water arrears have been identified.*

*A conclusion was made that the use of existing methods to ensure the safety of navigation in shallow waters is important, but does not cover the full range of safety measures that must be applied to keep the vessel on the planned trajectory. The list of different factors affecting the safety of navigation of big-size vessels, given in the analysis of recent studies and publications in this article, requires further research for their comprehensive accounting during navigation in shallow areas of water areas.*

**Keywords:** *safety of navigation, big-size container carrier, ship circulation, shallow water, artificial intelligence.*