

УДК 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-22-34

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ
ЕЛЕМЕНТІВ ОСТІЙНОСТІ МАЛИХ СУДЕН ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМУ**

О.О. Каніфольський

к.т.н., доцент кафедри

«Теорія і проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова»

oleksandrkanifolskyi@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

***Анотація.** В статті запропонований метод розрахунку кількісного співвідношення підтримуючих сил, що діють на корпус швидкісного судна під час руху. При розробці метода використані данні досліджень в дослідних басейнах та комп'ютерні програми Autocad та DialogStatika. Також в цій роботі запропонований метод розрахунку координат точок прикладення гідростатичної та гідродинамічної сил підтримки. Значення гідростатичної сили додатково було розраховано за допомогою формули Пітера дюКейна. В статті також розглянутий альтернативний метод обробки даних дослідження кренування судна. Цей спосіб визначення положення центру ваги судна може застосовуватися для обробки даних дослідження кренування суден зі специфічними формами обводів. Такий підхід може забезпечити додатковий контроль правильності розрахунків у нестандартних випадках.*

***Ключові слова:** остійність, перехідний режим руху, сили підтримання, дослід кренування.*

UDC 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-22-34

**IMPROVEMENT OF THE METHODS FOR CALCULATION OF THE
ELEMENTS OF STABILITY OF SMALL VESSELS IN TRANSITIONAL MODE**

Oleksandr Kanifolskyi

PhD, Docent

of Department «Ship Theory and Design named after prof. Vorobyev Yu.L.»

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

***Abstract.** The article proposes a method for calculating the quantitative ratio of the supporting forces acting on the hull of a high-speed vessel during movement. When developing the method, data from studies in towing tanks and computer programs AutoCAD and Dialog Statika were used.*

© Каніфольський О.О., 2022

Also in this paper, a method is proposed for calculating the coordinates of the points of application of hydrostatic and hydrodynamic supporting forces. The value of the hydrostatic force is additionally calculated using the Peter du Cane formula. The article also considers an alternative method for processing ship inclining test data. This method of determining the position of the ship's center of gravity can be used to process inclining test data for ships with specific contour shapes. This approach can provide additional control over the correctness of calculations in non-standard cases.

Keywords: *stability, transitional mode, supporting forces, inclining test.*

ВСТУП. Для оцінки остійності, у процесі проектування судна перехідного режиму руху, немає достатнього об'єму даних про кількісне співвідношення гідродинамічної й гідростатичної сил підтримки й точках їх прикладення. У цій статті передбачається визначити деякі відносні параметри, стосовно до сил, що діють на корпус судна в перехідному режимі руху. Також пропонується дати рекомендації для процесу обробки даних дослідження кренування суден з обводами, яким притаманна специфіка

Ціль роботи – запропонувати нові та удосконалити існуючі методи розрахунку значень вертикальних сил, що діють на корпус судна перехідного режиму руху та координат точок їх прикладення.

Для цього дослідження були використані експериментальні дані, отримані М.М. Буньковим [1]. Експеримент проводився над моделями суден перехідного режиму. Параметри моделей: відносна довжина 5,25; середній кут кілеватості 7,25°; середнє значення положення центру ваги по довжині, рахуючи від транця 0,4; значення коефіцієнта статичного навантаження $Cd = \Delta / \gamma B^3$ в границях від 0,427 до 0,854. Таке положення центру ваги по довжині судна буде характерно й для деяких типів військових кораблів і катерів перехідного режиму руху [2]. Результат експерименту представлений у вигляді залежностей відносної площі змоченої поверхні, $\Omega / V^{2/3}$; середньої змоченої довжини $L_{aw} = (L_{ch} + L_k) / 2$ (L_{ch} – довжина по скулі моделі; L_k – довжина по кілю) і кута диферента φ від відносної швидкості.

Для цього дослідження використовувалося програмне забезпечення: Autocad і DialogStatika. Обводи моделі М.М. Бунькова були накреслені в Autocad і намічене положення ватерлінії для кожної відносної швидкості, з урахуванням кута диферента, рисунок 1. Після визначення осадок носом і кормою, за допомогою програми DialogStatika, вкладки «Елементи водотоннажностей при різній посадці», була визначена гідростатична складова сил підтримки V_I й координати центру ваги цього об'єму x_{V_I} (точка відліку - мідель судна) і z_{V_I} (точка відліку – основна лінія).

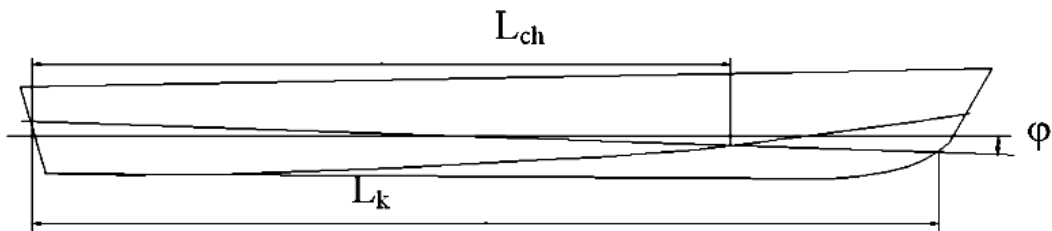


Рис. 1. Визначення осадок носом і кормою в Autocad

Відносне значення гідростатичної складової сил підтримки, рисунок 2, було розраховано декількома методами. Перший з них – значення, видані програмою DialogStatika, другий – формула запропонована Пітером дюКейном у [3]

$$\gamma V_1 = \gamma \frac{L_{aw}^2 B}{4} \sin 2\varphi \quad (1)$$

де φ – дифферент;

B – ширина судна;

γ – щільність води;

L_{aw} – середня змочена довжина.

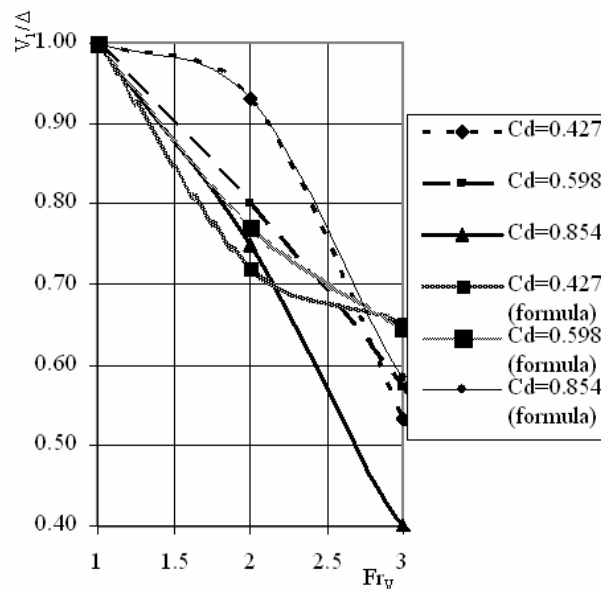


Рис. 2. Відносне значення гідростатичної складової сил підтримки, отримане за допомогою програми DialogStatika і формули Пітера дюКейна

Відносні координати точки прикладення гідростатичної складової сил підтримки показано на рисунках 3 і 4. Точки відліку для z_{V1} – основна лінія, для x_{V1} – транець.

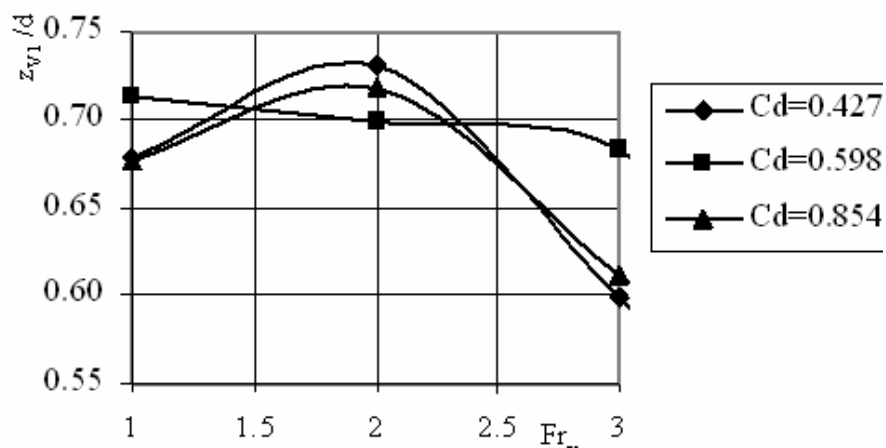


Рис. 3. Відносне значення аплікати z_{V1}
(d – осадка судна в режимі плавання)

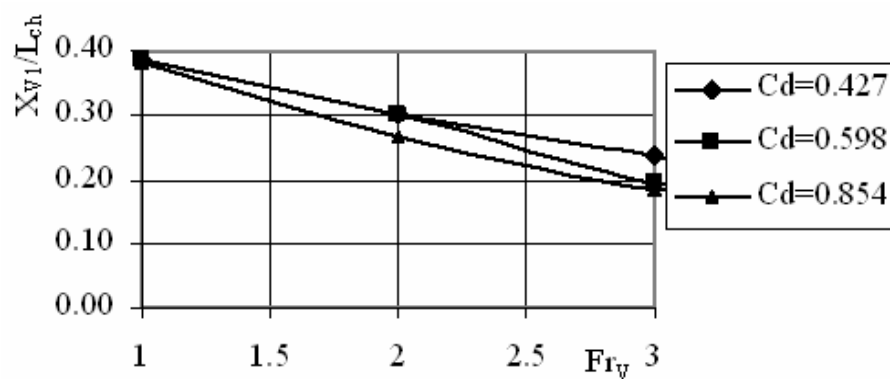


Рис. 4. Відносне значення абсциси X_{V1}
(L_{ch} – довжина по скулі в режимі плавання)

Гідродинамічна складова сил підтримки була визначена як різниця між ваговою водотоннажністю судна й гідростатичною складовою $Y = \Delta - \gamma V_l$. Відносне значення цієї сили й координата точки її прикладення x_y / L_{ch} показано на рисунках 5 і 6. На рисунку додатково показані дослідження ЕТТ [3]. У першому наближенні апліката прикладення сили Y приймалася на обшивці корпусу судна.

Абсциса точки прикладення гідродинамічної складової сил підтримки відлічувалася від транця й була визначена з рівняння моментів (2). Координати центру ваги судна x_g й z_g приймалися рівними $0.4L_{ch}$ (від транця) і $0,7D$, відповідно, де D – висота борту.

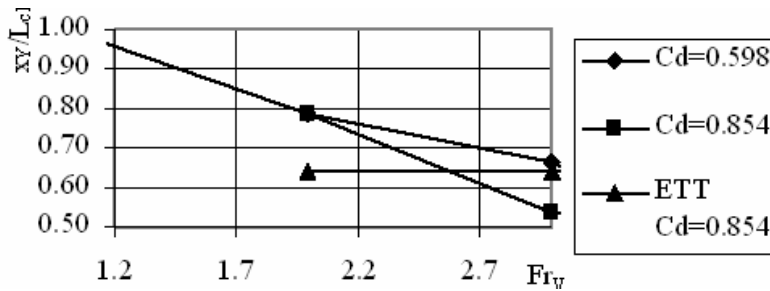


Рис. 5. Відносне значення абсциси точки прикладення гідродинамічної складової сил підтримки (L_{ch} – довжина по скулі в режимі плавання)

$$\gamma V_l (x_{V_l} \cos \varphi - z_{V_l} \sin \varphi) - \Delta (x_g \cos \varphi - z_g \sin \varphi) + Y (x_y \cos \varphi - z_y \sin \varphi) = 0 \quad (2)$$

Остійність суден перехідного режиму характеризується деякими, властивими тільки для цього типу руху, особливостями. В цьому режимі руху присутні два типи підтримуючих сил: гідростатичні й гідродинамічні сили. Мірою остійності в перехідному режимі буде відношення сумарного моменту, що відновлює, цих сил, до помноження водотоннажності судна на кут крену $h = \frac{\Sigma M}{\Delta \theta}$. Остійність, за таких умов, забезпечити досить складно. Тому що при русі з великими швидкостями кути крену більш ніж 12° не допускаються, що буде показано нижче, то мова надалі піде про остійність на малих кутах крену. Можна відзначити, що оцінка остійності і визначення відносної ширини судна перехідного режиму, із класичного рівняння остійності, пов'язана з деякими труднощами.

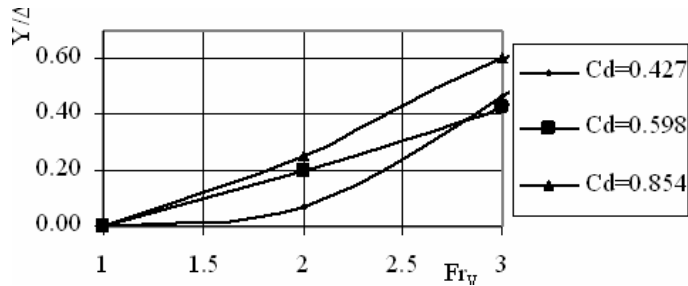


Рис. 6. Відносне значення гідродинамічної складової сил підтримки

У документі [4] пропонуються наступні вимоги до остійності суден у перехідному режимі руху. Пропонується мінімізувати час переходу судна з водотон-нажного режиму руху в неводотоннажний. Під останнім режимом мають на увазі варіант руху судна, коли гідродинамічні сили підтримки домінують над гідроста-тичними силами. Дуже важливо визначити співвідношення цих сил, для того, щоб уже на ранній стадії проекту мати можливість розраховувати показники остійності швидкохідного судна.

У водотоннажному режимі цей же документ пропонує оцінювати параметри діаграми статичної остійності (значення максимального плеча діаграми і його положення, метацентричну висоту, площі обмежені кривою плечей моментів, що відновлюють і ін.). Пред'являються так само вимоги до значення кута крену швидкохідного судна, у випадку неконтрольованого скупчення пасажирів у борту, кут крену в цьому випадку повинен бути не більш ніж $\theta \leq 10^\circ$. Ці питання розглянуті в [5].

У неводотоннажному режимі руху суден, пропонується розглядати момент, що кренить, який виник у результаті переміщення пасажирів до борту й одночасна дія вітрового моменту, що кренить ($\theta \leq 10^\circ$). Другий варіант розрахунків стосується обмеження зовнішнього кута крену ($\theta \leq 8^\circ$), при циркуляції. В останньому з розглянутих випадків правила пропонують обмежувати зовнішній кут крену ($\theta \leq 12^\circ$), при дії бічного вітру на циркуляції.

Як видно з наведеної інформації, у перехідному режимі руху кути крену не повинні перевищувати 12° .

З появою крену на циркуляції, можуть виникнути сила дрейфу й сила опору дрейфу. Ще одне припущення в цій роботі – це можливість не враховувати різницю в значеннях вертикальної гідродинамічної сили підтримки, у випадках крену судна на малий кут і його русі без крену.

Дані про точку прикладення гідродинамічної піднімальної сили показано на рисунку 5. Для спрощення розрахунків надалі прийняті дані ExperimentalTowingTank (ETT), у яких пропонується приймати точку прикладення сили Y на відстані $0,62L_{ch}$ від транця.

Осадка судна в цій точці визначалася за допомогою Autocad. Після розрахунків був зроблений наступний висновок: точка прикладення гідродинамічної піднімальної сили, при крені, розташована на відстані рівній $0.14B$ від діаметральної площини, рисунок 7. Цей результат був отриманий відповідно до припущення про те, що гідродинамічна піднімальна сила прикладена в центрі ваги відповідного поперечного перерізу корпусу судна. Розглядався корпус із формою глибокого V , кути крену не перевищують 15° , коефіцієнт повноти площі ватерлінії рівний $0,82$, коефіцієнт загальної повноти $0,5$ і відносна ширина судна $\frac{B}{d} = 4$.

Існує аналогія між розподіленнями гідродинамічних і гідростатичних тисків, по поперечному перерізу корпусу швидкохідного судна. Як відомо гідростатичні сили тиску води діють по нормалях до поверхні корпусу і їх вертикальні складові приводять до сили плавучості, яка прикладена в центрі ваги підводного об'єму. Для трикутних шпангоутів з вершиною на основній площині апліката центру величини розташована в центрі ваги трикутника $z_c = \frac{2}{3}d$, а для прямокутних шпангоутів у центрі ваги прямокутника $z_c = \frac{1}{2}d$, де d – осадка. Загальна формула для аплікати центру величини, для різних форм шпангоутів $z_c = \frac{I}{I + c_b / c_w} d$ включає коефіцієнти загальної повноти й повноти площі ватерлінії [6].

Як впливає з вищенаведених міркувань, точка прикладення гідростатичної сили підтримки буде розташовуватися біля центру ваги підводної частини шпангоута, в даному перетині по довжині. Враховуючи деякі подібності між розподілами гідростатичних і гідродинамічних тисків по ширині судна, можна припустити, що точка прикладення гідродинамічної піднімальної сили Y буде розташовуватися в центрі ваги підводного перетину шпангоута, при відповідно змінений в результаті руху осадці.

Таке допущення про положення точки прикладення гідродинамічної сили можна підтвердити, розрахувавши положення центру величини (враховуючи аналогію), при малих кутах крену, застосувавши відому формулу для

метацентричного радіуса $r = \frac{c_w^2 B^2}{12c_b d}$ й дані про відносну ширину судна й коефіцієнтах повноти відповідних до мінімізації опору води при русі судна в перехідному режимі $r\theta = \frac{c_w^2 B^2}{12c_b d} \theta = \frac{0,82^2}{6} \frac{B}{d} B\theta = 0,12B$ (рис. 8).

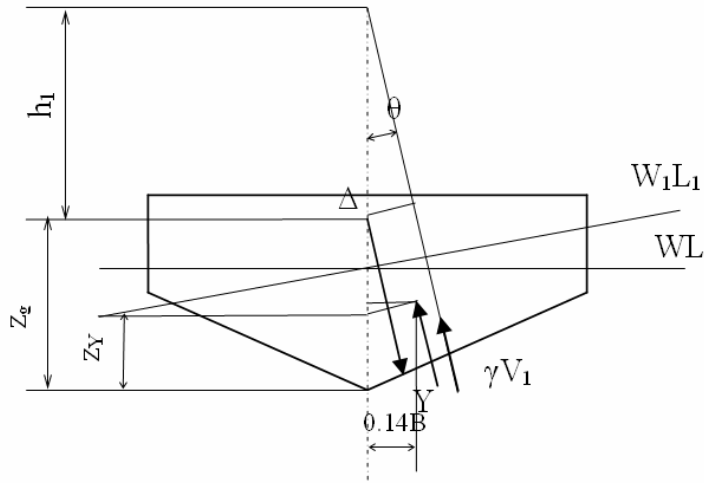


Рис. 7. Точка прикладення гідродинамічної піднімальної сили

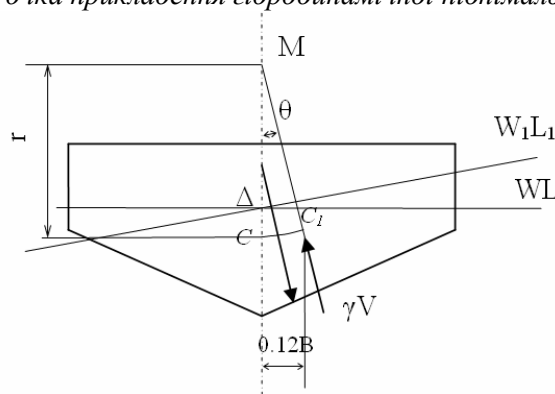


Рис. 8. Точка прикладення гідростатичної сили

Сумарний момент, що відновлює, відносно поздовжньої осі, що проходить через центр ваги судна

$$\Delta_0 h \sin \theta = \gamma V_1 h_1 \sin \theta + Y \left(\frac{0.14B}{\cos \theta} - (z_g - z_Y) \sin \theta \right) \quad (3)$$

Перша частина цього рівняння характеризує момент гідростатичних сил, друга частина момент гідродинамічних сил. Умовна метацентрична висота h може бути визначена із цього вираження.

В рівняння не включені сили, що з'являються на циркуляції. Ці моменти, що виникають від відцентрових сил, можливо, знизити за рахунок зменшення швидкості ходу, або збільшення діаметра циркуляції, що в результаті приведе до не перевищення припустимого значення кута крену. В основному судна перехідного

режиму руху мають гостроскулі або змішані обводи корпусу, що ускладнює розрахунки крену на циркуляції. Як відзначено в технічному звіті «Розробка матеріалів для нормування остійності маломірних суден», виконаному в ЦНДІ ім. акад. Кри-лова, кути крену на циркуляції для пасажирських малих суден без зниження швидкості не перевищували дванадцяти градусів.

Представляють інтерес розрахунки положення центру ваги судна z_g із застосуванням нового альтернативного методу обробки даних, які були отримані в результаті дослідження кренування судна. Традиційний метод, який застосовується в цей час, не завжди може дати точний результат для суден, що мають специфічну форму корпусу (істотний розвал бортів, гостроскулу форму, бульбовий носовий край, підйом кільової лінії). Знання про положення центру ваги судна, як результату методу кренування, надзвичайно важливе для процесу забезпечення безпечної експлуатації судна, зокрема для забезпечення його остійності.

Для розв'язання цього завдання був розроблений новий метод для аналізу даних дослідження кренування й проведено дослідження з визначення положення центру ваги моделі традиційним і альтернативним способом, у лабораторії ОНМУ. Традиційний і альтернативний метод були застосовані шляхом використання спеціальної установки. Модель для вивчення проведення дослідження кренування була розроблена приватдоцентом кафедри Миколою Мітцихом і обладнана шкалами поглиблень для виміру осадки, кренометром і вантажами (масою по 0,25 кг), які можна переміщати до бортів (рис. 9).

Надводний борт судна мав однакове значення 5,5 см. по всьому периметру. Осадка дорівнювала 14,5 см. на правому і лівому борті. Вагова водотоннажність моделі $\Delta = 33,3$ кг, висота борту 0,2 м, довжина 0,7 м, ширина 0,4 м.

Для контролю правильності проведення випробування, був накреслений графік (рис. 10), що показує залежність тангенса кута крену від моменту, що кренить. Мале відхилення точок від прямої лінії підтверджує правильність зробленого випробування.

Значення метацентричної висоти h_i були отримані з рівняння, яке характеризує рівність моментів, що кренить та відновлює $M_h = \Delta l = \Delta h \sin \theta$.

Середнє значення $h = \frac{\sum h_i}{n} = 0,034$ м було розраховано за результатами дослідження.

Далі були визначені значення метацентричного радіуса $r = 0.077$ м. і аплікати центру величини $z_c = 0.0725$ м. Метацентричний радіус був розрахований за допомогою традиційних методів теорії корабля. Аплікати центру величини була визначена як середина осадки. Підсумок традиційного аналізу дослідження кренування – це положення центру ваги моделі $z_g = 0,116$ м.



Рис. 9. Модель для проведення дослідження кренування

Альтернативний (графічний) метод аналізу дослідження кренування моделі може бути представлений у наступному вигляді. Перший варіант заснований на знаходженні положень метacentра, при різних кутах крену. На першому етапі аналізу дослідження кренування графічним методом, необхідно побудувати Чебишевський корпус. В додаток до перетину на міделі ще по чотири перетини розташовані в кормовій і носовій частинах судна. Положення цих площин було розраховано з використанням відповідних коефіцієнтів [7].

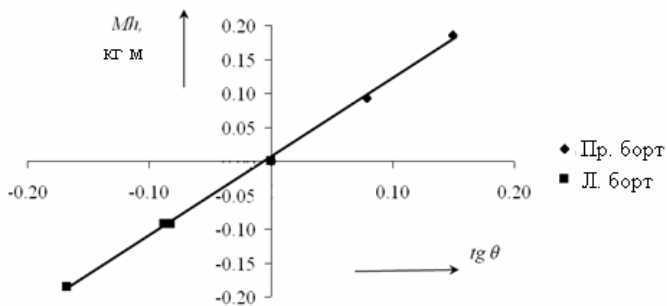


Рис. 10. Контрольний графік

Визначення положення центру ваги базується на обчисленні плечей остійності форми KN відносно кіля з використанням спеціальних комп'ютерних програм, наприклад, Dialog Statika. Далі викреслюється напрямок дії сил підтримки й після розрахунку плеча $NZ = \frac{M_h}{\Delta}$ графічно визначається положення центру ваги судна (рис. 11).

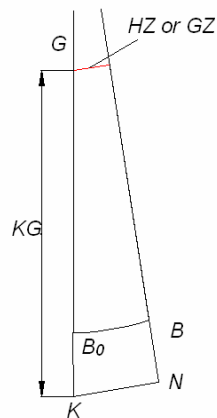


Рис. 11. Визначення положення центру ваги судна графічним методом (AUTOCAD)

Апліката центру ваги моделі отримана цим способом рівняється $Z_g = 0,116$ м. Для порівняння, значення цієї величини з досліду кренування $Z_g = 0,116$ м.

ВИСНОВКИ. Запропонований спосіб визначення положення центру ваги може застосовуватися для обробки даних досліду кренування суден зі специфічними формами обводів. Хоча цей спосіб більш трудомісткий, ніж той, що звичайно застосовується у корабельних розрахунках, але він може забезпечити додатковий контроль правильності розрахунків в нестандартних випадках.

Підсумок представлених даних зводиться до того, що на початкових етапах проектування необхідно переконатися в достатній остійності спроектованого судна й при необхідності відкоригувати головні розміри. Особливо це важливо для суден перехідного режиму руху, тому що це пов'язане з появою гідродинамічних сил. Необхідно визначити приблизно значення цих сил і координати точок їх прикладення для подальшого складання рівняння, що характеризує остійність. Звичайно кути крену в перехідному режимі обмежено 12° , що характеризується як остійність на малих кутах нахилу. Розрахунки виконані без обліку перекладки рулів і виникаючої сили дрейфу від опору борту. Можна припустити, що момент сили дрейфу буде залежати від плеча й в окремих випадках при близьких значеннях аплікати центру ваги судна й точки прикладення сили опору борту буде близький до нуля. Момент, що виникає від перекладки рулів, може бути врахований у наступних наближеннях, коли будуть додаткові дані про тип і розміри кермового обладнання.

Для визначення значення сил, що діють на корпус судна в перехідному режимі руху, і точок їх прикладення, були застосовані методи теорії корабля й теоретичної механіки (складання моментів сил відносно точки, обчислення положення центру маси тіла, експериментальні дані дослідних басейнів). Було використано програмне забезпечення Autocad і DialogStatika.

У результаті були запропоновані методи розрахунку значень сил, що входять у рівняння остійності, для суден перехідного режиму й координат точок їх прикладення. Дані, для попередніх розрахунків, були представлені в графічній формі й після підстановки їх у рівняння

$$\Delta_0 h \sin \theta = \gamma V_1 h_1 \sin \theta + Y \left(\frac{0.14 B}{\cos \theta} - (z_g - z_Y) \sin \theta \right)$$

може бути визначена умовна метацентрична висота. У випадку незадовільних значень цієї висоти головні розміри судна можуть бути відкориговані. В існуючих методах розрахунків немає даних про кількісні характеристики та точки прикладення сил підтримки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жинкин В.Б. *Ходкость быстроходных судов*. Л.: ЛКИ, 1980. 91 с.
2. Канифольский А.О., Конотопец Н.Н., Филь В.М. *Визначення критичного тягового зусилля повороту затопленого протичовнового корабля // Зб. статей Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. Київ, 2014. № 1 (122). С. 130-134, инв. № 45983.
3. Пунтер дюКейн. *Быстроходные катера*. Л: Судпромгиз, 1960. 328 с.
4. *International Maritime Organisation. International Code of Safety for High-Speed Craft*, 1994, London.
5. Канифольский А.О. *Пассажирский фактор при проектировании быстроходных однокорпусных водоизмещающих судов // Вісник Одеського національного морського університету*. 2001. № 9. С. 45-48.
6. Ашик В.В. *Проектирование судов*. Л.: Судостроение, 1985. 319 с.
7. Семенов-Тянь-Шанский В.В. *Статика и динамика корабля*. Л.: Судпромгиз, 1960. 574 с.

REFERENCE

1. Zhinkin V.B. *Propulsion of fast ships*. L.: LKI, 1980. 91 p.
2. Kanifolskyi O.O., Konotopets M.M., Fil V.M. *Designation of a critical traction force to turn a sunken naval ship // Collection of articles of the Ivan Chernyakhovsky National Defense University of Ukraine*, Kiev, 2014. № 1 (122). S. 130-134, inv. No. 45983.

3. *Peter du Cane. Speedboats. L.: Sudpromgiz, 1960. 328 p.*
4. *International Maritime Organization. International Code of Safety for High-Speed Craft, 1994, London.*
5. *Kanifolskyi O.O. Passenger factor in the design of high-speed monohull displacement ships // Bulletin of the Odessa National Maritime University. 2001. № 9. P. 45-48.*
6. *Ashik V.V. Ship Design. L.: Shipbuilding, 1985. 319 p.*
7. *Semenov-Tyan-Shansky V.V. Statics and dynamics of the ship. L.: Sudpromgiz, 1960. 574 p.*

Стаття надійшла до редакції 18.11.2021

Посилання на статтю: Каніфольський О.О. Удосконалення методів розрахунку елементів остійності малих суден перехідного режиму // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2022. № 1(67). С. 22-34. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-22-34.

Article received 18.11.2021

Reference a JournalArtic: Oleksandr Kanifolskyi. improvement of the methods for calculation of the elements of stability of small vessels in transitional mode. 2022. № 1(67). 22-34. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-22-34.