

УДК 532. 5:623.823.2

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.4\(24\).49-55](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.4(24).49-55)**О. О. РАССТРИГИН**, доктор технічних наук,
професор<https://orcid.org/0000-0002-1483-6111>**А. М. ЗІРКА**, кандидат технічних наук<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>**Д. М. БЕЛЯЄВ**, кандидат технічних наук<https://orcid.org/0000-0001-6707-554X>(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ)

Методика розрахункової оцінки гідродинамічної повздовжньої сили на корпусах перспективних швидкісних засобів при русі по водній поверхні різного стану

У статті розглядаються методичні аспекти побудови вдосконаленої методики щодо оцінки гідродинамічної повздовжньої сили при розрахунках гідродинамічних характеристик швидкісних засобів, що рухаються по водній поверхні (безпілотні літальні апарати, безкіпажні надводні засоби, швидкісні судна, гідроплани, екраноплани, глисируючі засоби ураження, тощо), а також можливості обґрунтування та формування тактико-технічних вимог до них й прийняття проектних рішень на етапі їх концептуального проектування.

Ключові слова: методика оцінки гідродинамічної повздовжньої сили, безпілотні літальні апарати, швидкісні судна, тактико-технічні вимоги

В статье рассматриваются методические аспекты построения усовершенствованной методики оценки гидродинамической продольной силы при расчетах гидродинамических характеристик скоростных средств, которые движутся по водной поверхности (беспилотные летательные аппараты, безкипажные надводные средства, скоростные суда, гидропланы, экранопланы, глиссирующие средства поражения, и т. п.), а также возможности обоснования и формирования тактико-технических требований к ним и принятие проектных решений на этапе их концептуального проектирования.

Ключевые слова: методика оценки гидродинамической продольной силы, беспилотные летательные аппараты, скоростные суда, тактико-технические требования

ВСТУП

Проблема отримання достовірної інформації про гідродинамічні характеристики об'єктів, що розробляються, та знаходяться в процесі експлуатації та повинні взаємодіяти з водною поверхнею (швидкісні судна, гідролітаки, літаки-амфібії, екраноплани та ін.) дуже складна та важлива.

Значена інформація у багатьох випадках є вирішальною для прийняття рішення щодо остаточного вибору обрисів перспективного зразка озброєння та військової техніки (ОВТ) на основі альтернативних варіантів, які розглядаються у процесі як концептуального, так і попереднього проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час для визначення динамічних характеристик, які безпосередньо пов'язані з морехідністю, використовується, як правило, фізичне моделювання у гідробасейнах або на відкритій воді [1]. Такий метод достатньо дорогий за умов необхідності наявності великого обсягу унікального обладнання, динамічного та геометрично подібної моделі досліджуваного зразка, великих енергетичних витрат. Крім того, необхідність внесення змін в компонування зразка у процесі досліджень або його перекомпонування за результатами отриманих експериментальних даних дуже складний процес, що потребує значних коштів і часу. Результати таких досліджень не завжди інформативні, також при цьому виникають питання стосовно закону руху моделі та їх переносу на натурні зразки. Більшість відомих розрахункових підходів щодо визначення динамічних характеристик швидкісних суден обмежено застосуванням лише для окремих режимів, що не дозволяє їхнє використання у всьому діапазоні швидкостей ходу і стану водної поверхні та мають багато припущень та обмежень [1–4]. Це, у свою чергу, потребує проведення додаткових експериментальних досліджень для визначення поправок до чисельних моделей, що пов'язано з вищезазначеними труднощами та великими затратами.

У зв'язку з відзначеним було розроблено вдосконалену методику для оперативного оцінювання гідродинамічних характеристик швидкісних об'єктів у процесі руху по водній поверхні різного стану, що заснована на синтезі різних методик та моделей з врахуванням додаткових напрацювань, що були отримані останніми роками та дозволяє із задовільною для практики точністю отримувати необхідну інформацію у широкому діапазоні швидкостей ходу.

Зокрема, в статті розглянуто побудову вдосконаленої методики визначення повздовжньої складової загальної гідродинамічної сили. Викладений матеріал по суті є продовженням матеріалу, що опублікований в роботі [5].

Метою роботи є вдосконалення методики розрахунку в моделі гідродинаміки повздовжньої складової сумарної гідродинамічної сили, що діє на днище корпусу досліджуваного об'єкта у процесі його руху по водній поверхні.

Результати розрахунків. Відповідно до раніш прийнятого підходу, а саме спрощення рішення задачі нестационарної взаємодії тіл з вільною поверхнею рідини

(ВПР) (глісування, посадка на воду), шляхом зведення просторової задачі до плоскої [1–7] надалі дослідження передбачають використання методу плоских перетинів (МПП).

Суть методу та основні його припущення розглянуті в роботах [1–3] та попередньої статті авторів [5]. До речі коректне застосування МПП передбачає наявність великих змочених подовжень досліджуваних об'єктів (відношення змоченої довжини до ширини), що характерно для сучасних транспортних засобів водного базування при русі по водній поверхні.

Таким чином, у МПП розглядаються вертикальні площини, перпендикулярні поздовжній осі, що розташована на відомій (заданій) відстані від початку нерухомої системи координат. Гідродинаміка перетинів на різних фазах занурення контуру в рідину визначається з використанням аналітичних теорій [2, 4]. На режимі занурення до замиву скул в основі розрахунку гідродинамічних характеристик (ГХ) перетинів тут використовується лінійна теорія: теорія автоматичного занурення Вагнера [4], або теорія Седова [2] про удар клина, що плаває на поверхні рідини. На перехідному режимі використовується функція Логвиновича [2, 4], а на режимі після замиву скул – теорія Бобилева [4].

Такий підхід дозволяє при нескладному профілюванні обводів днищ оперативно одержувати ГХ досліджуваних об'єктів за рахунок використання аналітичних залежностей для розрахунку гідродинаміки перетинів із прийнятною точністю на етапі концептуального формування вигляду й вимог до таких об'єктів. Крім того, запропонований підхід не виключає можливість використання результатів ГХ контурів (шпангоутів), отриманих експериментально, наприклад, в ударних (бризкових) камерах [7].

Рух об'єкту досліджень (ОД) можна описати диференціальними рівняннями, що встановлюють зв'язок між координатами, швидкостями, прискореннями та силами й моментами, що діють на нього [5, 7].

Розглянемо прямування корпусу швидкісного ОД по воді в нерухомій декартовій системі координат $Oxyz$. Вісь Ox спрямуємо уздовж напрямку руху, вісь Oy – вертикально вгору, вісь Oz – перпендикулярно осям Ox , Oy на правий борт (рис. 1). Поряд із цим будемо використовувати рухому систему координат, зв'язану з центром мас ОД $O_1\xi\eta\zeta$ (рис. 1), де \vec{V}_0 – вектор переносної швидкості.

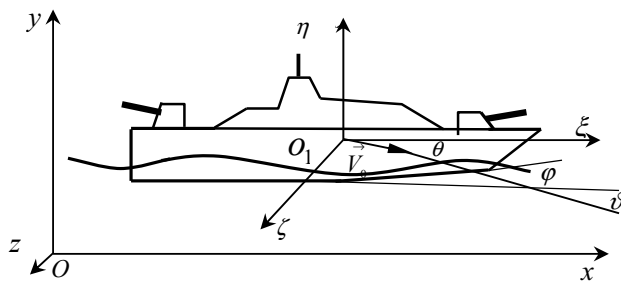


Рис. 1. Системи координат

Кутове положення ОД щодо нерухомої системи координат визначається кутами тангажа ν , диферента φ і нахилу траєкторії (посадки) θ . Через невеликі значення кута посадки θ надалі прийняте $\nu \approx \varphi$ [1–4], $\sin \nu \approx \vartheta$, а вертикальна сила в перетинах змоченої частини днища корпусу вважається рівною нормальній [1].

Проблема дослідження морехідних характеристик корпусу при русі по водній поверхні в загальній математичній постановці [4], навіть при її лінеаризації настільки складна, що на практиці в більшості випадків ідуть по шляху її подальшого спрощення [1–7]. Це стосується, у першу чергу, спрощення початкової при постановці задачі моделі середовища, зниження розмірності, обмеження розглянутих режимів руху, геометрії днищ й інших.

Відповідно до запропонованого, для чисельної реалізації МПП передбачається реалізація таких обмежень і допущень:

- нестисливість рідини $\text{div} \vec{V} = 0$;
- відсутність сил, обумовлених в'язкістю середовища (ідеальна рідина) $\text{Re} \rightarrow \infty$;
- відсутність крену й ковзання зразка при русі по воді;
- геометрія днища корпусу апроксимується плоскокілеватою формою зі скулами.

Розглянемо далі докладніше побудову методики визначення гідродинамічної поздовжньої сили при поздовжньому русі по воді абсолютно твердого корпусу з використанням МПП.

Занурення точки кіля в довільному перетині ξ щодо незбуреного рівня води (у зв'язаній системі координат $O_1\xi\eta$) у момент часу t (рис. 2) можна визначити таким чином [3]

$$\eta(\xi) = \eta^*(\xi) - y_g - \xi \vartheta + \eta_k(\xi) + \eta_g, \quad (1)$$

де $\eta^*(\xi)$ – ордината ВПР відносно незбуреного рівня, обумовлене наявністю хвильового руху й сліду в перетині ξ ; y_g – ордината центра мас зразка в нерухомій системі координат; ξ – ордината поточного перетину уздовж осі $O_1\xi$; $\eta_k(\xi)$ – ордината кіля зразка в перетині ξ ; η_g – ордината положення центра мас зразка в рухомій системі координат.

Уведемо індекси диференціювання за часом « \cdot » і за координатою ξ – « \prime » відповідно.

Значення швидкості $\dot{\eta}(\xi)$ й прискорення $\ddot{\eta}(\xi)$ занурення точки кіля для довільного перетину ξ визначають шляхом диференціювання виразу (1).

Відповідно до прийнятого підходу [1–4], імпульс сили, що діє на тіло, визначається реакцією води й дорівнює зміні кількості руху рідини за час удару dt . Використовуючи теорію приєднаних мас m , розглянувши процес занурення тіла як безперервну серію ударів, можна записати відомий вираз для гідродинамічної нормальній сили (для малих кутів кінематичних параметрів приблизно рівній гідродинамічній піднімальній силі) на одиницю довжини змоченого днища човна зразка.

$$f_{y_{\infty}}(\xi) = \frac{d}{dt} (m \cdot \dot{\eta}), \quad (2)$$

де m – приєднана маса перетину, що визначається через кут кілеватості перетину β до замиву скул (режим

«трикутника» – « Δ ») або ширину клина b_{ck} після замиву скул – « Θ ».

Приєднані маси для розглянутих режимів занурення визначається наступними виразами:

$$m_{\Delta} = \rho k(\beta) \eta^2 \quad \text{при } \eta < \frac{2b_{ck}}{\pi g \beta}; \quad (3)$$

$$m_{\Theta} = \rho n(\beta) b_{ck}^2 \quad \text{при } \eta > \frac{2b_{ck}}{\pi g \beta},$$

де η – занурення нижньої точки клину; $k(\beta) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\pi}{2\beta} - 1 \right)^2$, $n(\beta) = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\beta}{\pi} \right)$ – коефіцієнти приєднаних мас для відповідних режимів занурення контуру (шпангоута).

З врахуванням (1–3) після перетворень вирази для гідродинамічної нормальної (піднімальної) сили на одиницю довжини змоченого днища човна для режиму до замиву скул можна представити наступним чином

$$f_{y_{\Delta}}(\xi) = 2\rho k(\beta) \eta \dot{\eta}^2 - V \rho k'(\beta) \eta^2 \dot{\eta} + \rho k(\beta) \eta^2 \ddot{\eta}. \quad (4)$$

Виділяючи в (4) постійні та змінні складові, можна записати наступне рівняння

$$f_{y_{\Delta}}(\xi) = f_{y_{\Delta}}^*(\xi) - a_{11} \ddot{y} - a_{12} \ddot{\vartheta} + a_{13} \ddot{V}, \quad (5)$$

де коефіцієнти $a_{ij\Delta}(\xi, \eta)$ ($i=1, j=1, \dots, 3$) визначаються, як

$$\begin{aligned} a_{11\Delta} &= \rho k(\beta) \eta^2, \\ a_{12\Delta} &= \rho k(\beta) \eta^2 \xi, \\ a_{13\Delta} &= \rho k(\beta) \eta^2 (\vartheta + h'_k). \end{aligned} \quad (6)$$

Стационарна складова $f_{y_{\Delta}}^*(\xi)$ з (5) визначиться таким чином

$$\begin{aligned} f_{y_{\Delta}}^*(\xi) &= \rho(2\dot{\vartheta} - h'_k V) V k(\beta) \eta^2 - \rho(k'(\beta) \eta V - \\ &- (k(\beta) \eta V - 2k(\beta) \dot{\eta}) \eta \dot{\eta} + \rho k(\beta) \eta^2 \dot{\eta}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для режиму із замивом скул до (2) необхідно додати $H(\lambda)$ – силу опору клину при відривному обтіканні скул. Ця сила визначається за гіпотезою стаціонарності за допомогою функції Бобилева $B(\beta)$ й перехідної функції Логвиновича $H(\lambda)$ [4]

$$f_{y_{\Theta}}(\xi) = \frac{d}{dt} \left(m \dot{\eta} \right) + \rho B(\beta) H(\lambda) b_{ck} \dot{\eta}^2, \quad (8)$$

де функція Бобилева визначається виразом [4]

$$B(\beta) = \frac{2\pi}{\pi + 4} \sqrt{1 - \frac{2\beta}{\pi}} \quad \text{при } \beta < 60^\circ, \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\eta}{b_{ck}} - \frac{2}{\pi} \text{tg} \beta + \lambda_{\max}, \quad (10)$$

де $\lambda_{\max} = \left[\frac{1,42\pi B(\beta)}{4k(\beta) \text{tg} \beta} \right]^4$; $H(\lambda) = \frac{1,42}{\lambda^{0,25}}$.

Після перетворень одержимо рівняння:

$$f_{y_{\Theta}}(\xi) = f_{y_{\Theta}}^*(\xi) - a_{11\Theta} \ddot{y} - a_{12\Theta} \ddot{\vartheta} + a_{13\Theta} \ddot{V}, \quad (11)$$

де коефіцієнти $a_{ij\Theta}(\xi, \eta)$ ($i=1, j=1, \dots, 3$) визначаються як

$$\begin{aligned} a_{11\Theta} &= \rho n(\beta) b_{ck}^2, \\ a_{12\Theta} &= \rho n(\beta) b_{ck}^2 \xi, \\ a_{13\Theta} &= \rho n(\beta) b_{ck}^2 (\vartheta + h'_k), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} f_{y_{\Theta}}^*(\xi) &= \rho(2\dot{\vartheta} - h'_k V) V n(\beta) \eta^2 - \rho[n'(\beta) b_{ck} + 2n(\beta) \eta b'_{ck}] V - \\ &- H(\lambda) B(\beta) \eta \dot{\eta} b_{ck} + \rho n(\beta) b_{ck}^2 \dot{\eta}. \end{aligned} \quad (13)$$

При розрахунках для будь-якого режиму занурення у випадку $\eta < 0$ або $\dot{\eta} < 0$ приймається $f_{y_{\Theta}} = 0$.

Гідростатичні сили визначаються залежно від режиму занурення за наступними залежностями

$$\begin{aligned} f_{y_{\Delta}}(\xi) &= \rho g \frac{\pi}{\text{tg} \beta} (1 - 0,25\pi) \eta^2, \\ f_{y_{\Theta}}(\xi) &= \rho g (2\eta - b_{ck} \text{tg} \beta) b_{ck}. \end{aligned} \quad (14)$$

Гідродинамічна сила в перетині ζ для будь-якого режиму руху в загальному випадку визначиться виразом

$$f_y(\xi) = f_{y_{\Delta}}^*(\xi) + f_{y_{\Theta}}(\xi) - a_{11} \ddot{y} - a_{12} \ddot{\vartheta} + a_{13} \ddot{V}, \quad (15)$$

де $f_{y_{\Delta}}^*(\xi) = a_{11} = a_{12} = a_{13} = 0$ при $\eta < 0$ або $\dot{\eta} < 0$, в інших випадках

$$f_{y_{\Delta}}^*(\xi) = (2\dot{\vartheta} - h'_k V) V C u^2 - (C_1 V - C_2 \dot{\eta}) u \dot{\eta} + C u^2 \dot{\eta}, \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned} a_{11} &= C u^2, \\ a_{12} &= C u^2 \xi, \\ a_{13} &= C u^2 (\vartheta + h'_k). \end{aligned} \quad (17)$$

Гідростатична сила визначиться як

$$f_{y_{\Theta}}(\xi) = u C_3. \quad (18)$$

У всіх наведених виразах режими руху визначаються з умов (3).

Для зручності надалі доданим вектори параметрів, де верхнє значення приводиться для режиму до замиву скул « Δ », нижнє – із замивом « Θ »:

$$u = \left\{ \begin{array}{l} \eta \\ b_{ck} \end{array} \right\}; \quad C = \left\{ \begin{array}{l} k(\beta) \\ n(\beta) \end{array} \right\}; \quad C_1 = \left\{ \begin{array}{l} k'(\beta) u \\ n'(\beta) u + 2C b'_{ck} \end{array} \right\}; \quad (19)$$

$$C_2 = \left\{ \begin{array}{l} 2C \\ H(\lambda) B(\beta) \end{array} \right\}; \quad C_3 = \left\{ \begin{array}{l} \pi u^2 \text{tg} \beta^{-1} (1 - 0,25\pi) \\ 2\eta - \text{tg} \beta \end{array} \right\}.$$

В загальному випадку горизонтальна сила $f_x(\xi, \eta)$ в перетині ξ корпусу, що рухається по водній поверхні, є сумою нормальної й дотичної складових

$$f_x(\xi) = f_{x_p}(\xi) + f_{x_{mp}}(\xi), \quad (20)$$

де $f_{x_p}(\xi), f_{x_{mp}}(\xi)$ – складові сил тиску і тертя в перетині ξ відповідно.

Опором бризкових струменів на ділянках глісируючих поверхонь, що торкаються зі збуреним рівнем водної поверхні, у подальшому будемо нехтувати [2, 4].

Складова сили опору тиску в перетині ξ може бути визначена як проекція сили $f_y(\xi)$ у цьому ж перетині на вісь $O1\xi$, зв'язаної з центром мас системи координат [3, 7]

$$f_{x_p}(\xi) = f_y(\xi)(\vartheta + \eta'_k(\xi)). \quad (21)$$

За аналогією з (7, 12) для обчислювання опору $f_x(\xi)$ у перетині ξ можна отримати наступний вираз

$$f_x(\xi) = (f_{y_{20}}^*(\xi) + f_{y_{2c}}(\xi)(\vartheta + h'_k) + f_{y_{2a}}^*(\xi)C_4u\beta' + \rho C_f u C_5 V^2 - a_{21}(\xi)y - a_{22}(\xi)\vartheta + a_{23}(\xi)V, \quad (22)$$

де коефіцієнти $a_{ij}(\xi)$ ($i=2, j=1, \dots, 3$) рівняння (22) визначаються за наступними залежностями

$$\begin{aligned} a_{21} &= Cu^2(\vartheta + h'_k + C_4), \\ a_{22} &= Cu^2\xi(\vartheta + h'_k + C_4), \\ a_{23} &= Cu^2(\vartheta + h'_k)(\vartheta + h'_k + C_4), \end{aligned} \quad (23)$$

де C_f – коефіцієнт тертя, що визначається в роботі за відомою інтерполяційною залежністю Прандтля-Шліхтинга для тертя плоских пластин, що обтікаються безмежним потоком при турбулентному прикордонному шарі [1, 6]

$$C_f = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}, \quad (24)$$

де Re – число Рейнольдса по змоченій довжині кіля l_k .

$$Re = \frac{V \cdot l_k}{\nu}, \quad (25)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини; коефіцієнти C_4, C_5 в залежності від режиму руху визначаються, як

$$C_4 = \begin{cases} 0,25\pi(\sin\beta \cos\beta)^{-1} \\ 0,5(\cos^2\beta)^{-1} \end{cases}, C_5 = \begin{cases} 0,5\pi(\sin\beta)^{-1} \\ (\cos\beta)^{-1} \end{cases} \quad (26)$$

Вважається, що гідродинамічні сили прикладені по середині змоченої щeki клина і в цій же точці обчислюється кут між нормаллю до днища і віссю Ox .

Сумарні гідродинамічна нормальна сила R_y , поздовжня сила R_x і поздовжній момент M_z визначаються інтегруванням уздовж змоченої довжини кільової лінії l_k елементарних сил перетинів, з використанням виразів, що наведені вище.

Рівняння для сумарної нормальної (піднімальної) гідродинамічної R_y (з врахуванням гідростатичної) сили за аналогією з поданням відповідних величин для перетину буде виглядати наступним чином

$$R_y = R_y^* - A_{11} \cdot \ddot{y} - A_{12} \cdot \ddot{\vartheta} + A_{13} \dot{V}, \quad (27)$$

де R_y^* – сумарна стаціонарна складова гідродинамічних і гідростатичної нормальних сил; A_{ij} ($i=1, j=1, \dots, 3$) – сумарні коефіцієнти при змінних параметрах, що визначають зміну сумарних гідродинамічних і гідростатичної нормальних сил.

Складові рівняння (27) визначаються наступними виразами

$$R_y^* = \int_{l_k} f_y^*(\xi) \cdot d\xi, \quad (28)$$

$$A_{11} = \rho b \int_{l_k} C d\xi, \quad (29)$$

$$A_{12} = \rho \int_{l_k} C \xi d\xi, \quad (29)$$

$$A_{13} = \rho \int_{l_k} C(\vartheta + \eta'_k(\xi)) d\xi.$$

За аналогією з вищенаведеним вираз для сумарної горизонтальної гідродинамічної, гідростатичної сил і сил тертя R_x буде мати такий вид

$$R_x = R_x^* - A_{21} \cdot \ddot{y} - A_{22} \cdot \ddot{\vartheta} + A_{23} \dot{V}, \quad (30)$$

де R_x^* – сумарна стаціонарна складова (від стаціонарної складової гідродинамічної, а також гідростатичної та тертя) горизонтальної сили зразка

$$R_x^* = \int_{l_k} f_x^*(\xi, \eta) \cdot d\xi, \quad (31)$$

сумарні коефіцієнти A_{ij} ($i=2, j=1, \dots, 3$) визначаються наступними виразами

$$\begin{aligned} A_{21} &= \rho \int_{l_k} Cu^2(\vartheta + \eta'_k(\xi) + uC_4\beta') d\xi, \\ A_{22} &= \rho b \int_{l_k} Cu^2(\vartheta + \eta'_k(\xi) + uC_4\beta') \xi d\xi, \\ A_{23} &= \rho \int_{l_k} Cu^2(\vartheta + \eta'_k(\xi) + uC_4\beta')(\vartheta + h'_k) d\xi. \end{aligned} \quad (32)$$

Аналогічним чином визначаються характеристики для сумарного поздовжнього моменту M_z . У загальному випадку поздовжній момент у перетині ξ визначається від нормальної й горизонтальної сил.

$$M_z = M_z^* - A_{31} \ddot{y} - A_{32} \ddot{\vartheta} - A_{33} \dot{V} \quad (33)$$

де M_z^* – стаціонарна складова поздовжнього моменту M_z від гідродинамічних, гідростатичних нормальної, поздовжньої і сил тертя

$$M_z^* = \int_{l_k} [(f_{y_{20}}^* + f_{y_{2c}}(\xi)) \cdot \xi + (h'_k + u\beta' C_4)(f_{y_{20}} C_8 + f_{y_{2c}}(\xi, \eta)(h_k + uC_6)) + \rho C_f u C_5 V^2 C_8] d\xi, \quad (34)$$

а сумарні коефіцієнти A_{ij} ($i=3, j=1, \dots, 3$) визначаються наступним чином

$$\begin{aligned} A_{31} &= \rho \int_{l_k} Cu^2[(\xi + h'_k(\xi) + \vartheta + u\beta' C_4) C_8] d\xi, \\ A_{32} &= \rho \int_{l_k} Cu^2[(\xi + h'_k(\xi) + \vartheta + u\beta' C_4) C_8] \xi d\xi, \\ A_{33} &= \rho \int_{l_k} Cu^2[(\xi + h'_k(\xi) + \vartheta + u\beta' C_4) C_8](\vartheta + h'_k) d\xi, \end{aligned} \quad (35)$$

де $C_6 = \begin{cases} 1 - 0,25\pi \\ 0,5 \lg \beta \end{cases}$; $C_7 = \begin{cases} 0,25\pi \\ C_6 \end{cases}$; $C_8 = h_k + uC_7$.

При розрахунках поздовжнього моменту плече поздовжньої сили перетину береться рівним відстані по висоті в зв'язаній системі координат від центра тяжіння перетину до середини його змоченого контуру. Для визначення відповідних плечей прикладання сил в

перетинах (гідродинамічної, гідростатичної і тертя) використовуються рекомендації робіт [2, 3].

Наведені вище залежності для розрахунку ГХ перетину отримані за умови нехтування повздовжнім перетіканням рідини під днищем корпусу, що має місце в дійсності. Для усунення цього недоліку в МПП надалі авторами [5] запропоновано методику врахування повздовжнього перетікання рідини під днищем корпусу, що використовує крилову аналогію і може застосовуватись як на режимах до замиву скул, так і після їх замиву.

Величина отриманої швидкості V_e [5] з врахуванням повздовжнього перетікання надалі використовується у всіх рівняннях для розрахунку ГХ перетинів замість значення V .

Величина ефективної швидкості для прийнятої геометрії контурів днища визначається ітераційним наближенням

$$V_e^k(\xi) = \frac{f_{y20}^*(\xi)}{C_9 V_e^{k-1}}, \quad (36)$$

де: $V_e^1 = 0$; $C_9 = \left\{ \frac{\pi u (tg \beta)^{-1}}{2u} \right\}$; k – номер ітерації.

Рішення (36) при чисельній реалізації здійснюється на алгоритмічному рівні, крім того, інтеграли у виразах (28, 29, 31, 32, 34, 35) при цьому замінюються кінцевими сумами.

Надалі для простоти у відповідних рівняннях будемо використовувати колишні позначення, припускаючи при цьому під значенням швидкості V її «ефективне» значення V_e .

Занурення контуру в рідину супроводжується деформацією її вільної поверхні [8]. Для підвищення точності результатів на режимі до замиву скул запропоновано надалі використовувати методику [5, 7], що дозволяє уточнити кількісну оцінку підпору невагомої рідини у функції кута кілеватості для деякої базової форми контуру за рахунок обліку впливу вагомості на ефект зустрічного руху рідини [9]. У процесі чисельних розрахунків наведена методика реалізується на алгоритмічному рівні.

З метою врахування стану водної поверхні і гідродинамічного сліду (у разі необхідності) на гідродинамічні характеристики досліджуваного об'єкту та динаміку його поведінки далі передбачається використовувати апробований науково-методичний апарат, що наведений в [7].

При проведенні обчислювального експерименту, з метою перевірки достовірності одержуваних результатів по наведеній моделі, у якості вихідних даних задавалися геометричні параметри моделі судна [10] з відомими сумарними гідродинамічними характеристиками (буксиривальним опором судна, рис. 2), які були отримані експериментальним шляхом [6]: водотоннажність $\Delta = 380$ т; розрахункова довжина $L=47,11$ м; довжина скули $L_{ск} = 39,6$ м; абсциса центра мас судна (щодо корми) $x_g = 15,84$ м ($\bar{x}_g = \frac{x_g}{L_B} = 0,4$); діапазон розрахункових швидкостей руху $V=2,5... 22,5$ м/с; діапазон

розрахункових чисел Фруда $F_{\Delta} = 0,3...2,67$; коефіцієнт статичного навантаження $C_{\Delta} = 0,886$.

Як видно з рис. 2 (крива 1) результати розрахунків у всьому діапазоні швидкостей досить добре збігаються з експериментом (помічені кружками – о).

В якості прикладу можливостей запропонованої методики на рис. 2 (крива 2) показані результати розрахунків буксиривального опору судна при зсуві центрування в ніс на 4,2% відносно заданого, що дозволяє знизити на 18% величину буксиривального опору на максимальній швидкості ходу, а також зменшити енергетичні витрати для досягнення заданих характеристик швидкохідності судна.

Наведені дані дозволяють зробити висновок щодо можливості зниження прогнозного опору судна вже на початковій стадії проектування і прийняття проектного рішення з вибору компоновки для реалізації його раціонального завантаження, що має значний інтерес для проектувальників.

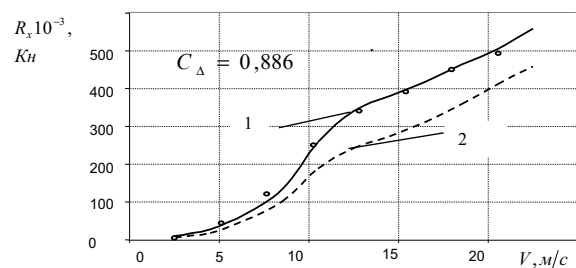


Рис. 2. Залежність буксиривального опору R_x судна від швидкості V його руху для різних значень центрування

$$\bar{x}_g: 1 - \bar{x}_g = 0,4; 2 - \bar{x}_g = 0,442$$

Висновки. Таким чином, наведена в даній роботі методика оцінки гідродинамічної повздовжньої сили на корпусах перспективних швидкісних засобів (безпілотні літальні апарати, безекіпажні надводні засоби, швидкісні судна, гідроплани, экраноплани, глисируючі засоби ураження, тощо) при русі по водній поверхні і особливості її чисельної реалізації дозволяють теоретично досліджувати особливості загальної гідродинаміки, урахувати особливості гідродинамічних характеристик при прийнятті проектних рішень на етапах загального проектування суден, що досить актуально для створення енергетично ефективних компонок сучасних транспортних засобів водного базування різноманітного призначення.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Косоуров К. Ф. Теоретические основы гидроавиации (гидромеханика гидросамолета). М.: Воениздат, 1961. 600 с.
2. Логвинович Г. В. Течения со свободными границами. Киев: Наукова думка, 1985. 296 с.
3. Тихонов А. И. Гидродинамические силы, действующие на плоскокилеватые пластины при неустановившемся глиссировании. Сб. работ по гидродинамике ЦАГИ. М., 1959. С. 167–182.

4. Логвинович Г. В. Погружение профилей в жидкость, удар и глиссирование. Тр. ЦАГИ. Вып. 707. М., 1958. 40 с.
5. Расстригин О. О., Зірка А. Л., Жолоб О. Г., Ястреба Т. В. Модель оцінки гідродинамічної нормальної сили на корпусах перспективних швидкісних засобів при русі по водній поверхні для обґрунтування і формування тактико-технічних вимог та проектних рішень до них на етапі концептуального проектування. Зб. наукових пр. АСВМІ. № 3 (15). Севастополь: АСВМІ, 2015. С. 28–38.
6. Егоров И. Т., Буньков Н. М., Садовников Ю. М. Ходность и мореходность глиссирующих судов. Л.: Судостроение, 1978. 336 с.
7. Расстригин А. А. Синтез требований к характеристикам гидродинамических свойств транспортных средств водного базирования: монография; под ред. А. П. Ковтуненко. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Синтез систем вооружения и военной техники. Киев: НАУ. Том 1, 2011. 500 с.
8. Wagner, H. Über Stoss – und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. ZAMM, 1932. H.4. P. 193–215.
9. Расстригин О. О. Методика визначення підпору та форми вільної границі при зануренні контурів у рідину на неповну змочену конструктивну ширину. Зб. наукових пр. ЦНДІ ОБТ ЗС України. Київ, 2008. № 21. С. 123–128.
10. Майборода О. М., Расстригин О. О. Дослідження гідродинамічних характеристик корпусу швидкісного судна типу БК-9. Зб. наукових пр. ЦНДІ ОБТ ЗС України. Київ. 2002. № 11. С.148–153.
- [Model of the estimation hydrodynamic normal power on body of the perspective speed facilities when moving on water surface for motivation and shaping tactical specifications and design decisions to them in step of conceptual design], Coll. of the scientific papers *ASBMI*. No. 3 (15), pp. 28-38.
6. Iehorov, I. T., Bunkov, N. M. and Sadovnikov, Yu. M. (1978), “Khodnost i moriekhodnost hlissiruyushchikh sudov” [Navigability and seaworthiness of planning vessels], *Sudostroeniie*, L., 336 p.
7. Rasstrigin, O. O. (2011), “Sintiez tribovani k kharakterystykam hidrodinamichnykh svoisty transportnykh sriedstv vodnoho bazirovaniia” [Syntheses of the requirements to feature hydrodynamic characteristic of the transport facilities of the water basing], *NAU*, K., 500 p.
8. Wagner, H. (1932), Collision and sliding on the surface of liquids, *ZAMM*, H. 4, pp. 193-215.
9. Rasstrigin, O. O. (2008), “Mietodyka vyznachiennia pidporu ta formy vilnoi hranytis pry zanurienni konruriv u ridynu na nepovnu zmochenu konstruktivnu shyrinu” [Methods of the determination buttress and forms of the free border at submersion sidebar in liquid on incompleteed constructive width], *Scientific Works of Central research inst. of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine*, No. 21, pp. 123-128.
10. Maiboroda, O. M. and Rasstrihin, O. O. (2002), “Doslilzhiennia hidrodinamichnykh kharakterystyk korpusu shvydkisnogo sudna typu BK-9” [Study hydrodynamic features of the body speed ship type BK-9], *Scientific Works of Central research inst. of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine*, No. 11, pp. 148-153.

REFERENCES

1. Kosourov, K. F. (1961), “Teoreticheskie osnovy hidroaviatsii (hidromekhanika hidrosamolieta)” [Theoretical bases hydroaviation (hydromechanics hydroplane)], *Voienizdat*, M., 600 p.
 2. Lohvinovich, H. V. (1985), “Tiechieniie so svobodnymi hranitsami” [Currents with free border], *Naukova dumka*, K., 296 p.
 3. Tikhonov, A. I. (1959), “Hidrodinamicheskie sily, dieystvuyushchiie na ploskokilievye plastiny pri nieustanovivshiesia hlissirovani” [Hydrodynamic forces acting on plane-keel plates with unsteady planing], coll. papers on hydrodynamics *САНІ*, pp. 167–182.
 4. Lohvinovich, H. V. (1985), “Pohrzhieniie profiliev v zhydkost, udar i hlissirovaniie” [Submersion of the profiles in liquid, blow and planing], works *САНІ*, No. 707, 40 p.
 5. Rasstrigin, O. O., Zirka, A. L., Zholob, O. H. and Iastrieba, T. V. (2015), “Modiel otsinky hidrodinamichnoi normalnoi syly na korpusakh pierspektivnykh shvydkisnykh zasobiv pry rusi po vodnii povierkhni dlia obhruntuvannia i formuvannia taktyko-tiekhichnykh vymoh ta proiektnykh rishien do nych na ietapi kontseptualnogo proiektuvannia” [Model of the estimation hydrodynamic normal power on body of the perspective speed facilities when moving on water surface for motivation and shaping tactical specifications and design decisions to them in step of conceptual design], coll. of the scientific papers *ASBMI*. No. 3 (15), pp. 28-38.
- Відомості про авторів:**
- Расстригин Александр Олександрівич**
доктор технічних наук, професор
головний науковий співробітник
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України,
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1483-6111>
e-mail: 0679450438r@ukr.net
- Зірка Андрій Леонідович**
кандидат технічних наук
начальник науково-дослідного відділу розвитку радіотехнічних засобів науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України,
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>
e-mail: alzirka@ukr.net
- Беляв Данило Миколайович**
кандидат технічних наук
науковий співробітник
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України,
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6707-554X>
e-mail: Danilla76@ukr.net

Information about the authors:**Oleksandr Rasstrygin**

Doctor of Technical Sciences, Professor
General Researcher
of Central research institute of weapons and military equipment
of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1483-6111>
e-mail: 0679450438r@ukr.net

Andrii Zirka

Ph.D
Chief of Research Development Department of Radio Equipment
Research management of Armament and Military Equipment
of the Air Force of Central Research Institute of Armament and
Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5304-2894>
e-mail: alzirka@ukr.net

Danil Belyaev

Ph.D
Research Associate
of Central research institute of weapons and military equipment
of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6707-554X>
e-mail: Danilla76@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 28.10.2019 р.