

УДК 532.512.:629.735.35

О.О. РАССТРИГІН, д-р техн. наук, А.Л. ЗІРКА, інж.
(Центр. наук.-дослід. ін-т озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТИСКУ ПІД ЧАС ЗАНУРЕННЯ КОНТУРІВ У РІДИНУ ЗА РІЗНИМИ АНАЛІТИЧНИМИ ТЕОРІЯМИ

Проведено аналіз результатів аналітичних теорій Г. Вагнера, Дж. Пірсона та Г.В. Логвиновича й здійснено порівняльну оцінку розподілу тисків, які було отримано за їхньою допомогою з метою визначення найбільш привабливої із них для подальшого використання у розрахунках локальної міцності днищ човнів швидкісних транспортних засобів водного базування.

Проведен анализ результатов теорий Г. Вагнера, Дж. Пирсона и Г.В. Логвиновича и выполнена сравнительная оценка распределения давлений, которые были получены с их помощью с целью определения наиболее приемлемой из них для дальнейшего использования в расчетах локальной прочности днищ лодок быстроходных транспортных средств водного базирования.

Постановка проблеми. Необхідність забезпечення достатньої міцності конструкцій днищ швидкісних транспортних засобів (ТЗ) під час взаємодії із водною поверхнею дуже актуальне та складне питання.

Незважаючи на те, що на сьогодні розроблено досить потужні пакети прикладних програм із розрахунку та оцінки навантажень на елементи конструкції, у тому числі ТЗ водного базування (ВБ), вони не дозволяють оперативно отримувати потрібну інформацію. Розрахунки з використанням зазначених програм дуже тривалі. Також не завжди зрозуміло, яким чином у цьому разі реалізуються конкретні режими завдяки відсутності конкретної інформації про математичні моделі, які використано, та алгоритмічні підходи щодо особливостей їхньої реалізації у пакетах прикладних програм.

Крім того, слід підкреслити, що внесення змін у конструкцію зразків, які зазначено, під час їхнього створення потребує іноді суттєвого коригування розрахункових даних, що не завжди можна зробити оперативно, а тому такий підхід не є дуже ефективним за різними точками зору.

Як правило, на прикінцевому етапі застосовується експеримент на геометрично подібних моделях у гідробасейнах або на відкритій воді, що також, в окремих випадках, призводить до коригування гідродинамічного компонування та повторних досліджень, які є дуже витратними.

Тому конструкторам потрібно вже на початкових стадіях проектування мати досить надійну інформацію про гідродинамічні навантаження на днища об'єктів, які розробляються.

Це можливо реалізувати за допомогою, перш за все, результатів аналітичних теорій.

Аналіз результатів досліджень і публікацій різних учених зі зазначеного напрямку (дивись, наприклад, роботи [1,2]) свідчить, що більшість із них використовує лінійну теорію, тому мають багато обмежень та припущень, неврахуванні іноді важливі аспекти, які суттєво можуть впливати, в окремих випадках, на кінцевий результат. Разом із цим, використовуючі їхні результати за основу та доповнюючи їх певним чином можна коректно скорегувати аналітичні залежності з врахуванням особливостей процесу й тим самим підвищити точність результатів зі збереженням оперативності отримання необхідної інформації, що дуже актуально та важливо.

Метою роботи є аналіз результатів аналітичних теорій Г. Вагнера, які викладено в роботі [3], Д. Пірсона – [4] й Г.В. Логвиновича – [5] для випадку двомірної постановки задачі під час автономного симетричного занурення плоскокілеватих тіл у нестисливу рідину до замиву скул із постійною швидкістю щодо одержання інформації про локальні гідродинамічні навантаження на них та можливості використання результатів,

© О.О. РАССТРИГІН, А.Л. ЗІРКА, 2015

які отримано, з метою оцінки локальної міцності днищ човнів швидкісних ТЗ ВБ у разі взаємодії із водною поверхнею зі застосуванням методичного апарата, який запропоновано авторами.

В подальшому проведемо короткий аналіз результатів аналітичних теорій, які згадано, а також порівняння результатів розрахунків із їхнім застосуванням для плоскокілеватих тіл та зробимо пропозиції щодо удосконалення методичного апарата з метою отримання необхідної інформації щодо локальних навантажень конструкцій днищ ТЗ ВБ під час взаємодії із водною поверхнею.

Слід підкреслити, що метою статті не є обговорення обмежень математичних моделей, припущень, які прийнято, моделей середовищ та ін., так як вони для даного випадку (постановки задачі) є, як правило, загальновідомими, а буде робитися акцент на розроблення пропозицій із вибору найбільш приємних аналітичних залежностей серед теорій, що розглянуто, та розроблення пропозицій щодо отримання із їхньою допомогою розрахункових гідродинамічних характеристик, які найбільш збігаються з експериментальними даними завдяки вдосконаленню методичного апарата.

Результати досліджень. Для теорій, які викладено в роботах [3-5], розрахунки передбачають отримання безрозмірних тисків \bar{p} , які розподілено вздовж щокі контуру відносно динамічного тиску

$$\bar{p} = \frac{2p}{\rho V_y^2}, \quad (1)$$

де p – розмірний тиск у конкретній точці контура; ρ – густина рідини, в яку занурюється контур; $V_y = V \sin \varphi$ – вертикальна швидкість занурення контура в рідину; V, φ – поступова швидкість ТЗ ВБ та кут його диферента відповідно.

В зв'язку з тим, що на практиці в разі створення ТЗ ВБ днища мають у більшості випадків обводи плоскокілеватого форми або близькі до них (рис.1), у подальшому будемо розглядати саме такі контури (типіві шпангоути).

Спочатку розглянемо результати теоретичних досліджень за теорією Д. Пірсона, яку викладено в роботі [4].

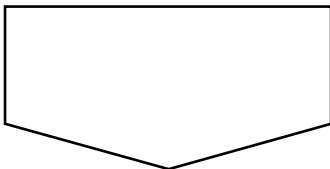


Рис.1. Геометрія контура

Згідно з роботою [4] безрозмірний тиск \bar{p} уздовж щокі клину під час вертикального занурення з постійною швидкістю V_y для малих кутів кілеватості клину визначається наступною залежністю:

$$\bar{p} = \frac{2}{u\sqrt{1-\bar{z}^2}} - \frac{1}{\left(\frac{1}{1-\bar{z}^2}\right)^2 - 1} + 1, \quad (2)$$

де $\bar{z} = z/c$ – безрозмірна поточна координата відносно поверхні клина c , яку змочено, під час занурення; $u = \frac{V_y}{dc} dt = \frac{2tg\beta}{\pi}$ – співвідношення вертикальної швидкості занурення та швидкості «розширення» щокі плоскокілеватого клина.

З урахуванням зазначеного залежність (2) для випадку плоскокілеватого клина буде виглядати, як

$$\bar{p} = \frac{\pi}{tg\beta\sqrt{1-\bar{z}^2}} - \frac{1}{\left(\frac{1}{1-\bar{z}^2}\right)^2 - 1} + 1. \quad (3)$$

Аналіз залежності (3) дає наступне: максимальне значення тиску

$$\bar{p}_{\max} = u^{-2} + 2 = \frac{\pi^2}{4tg^2\beta} + 2 \quad (4)$$

в точці з координатою $\bar{z} = \sqrt{1-u^2} = \sqrt{1 - \frac{4tg^2\beta}{\pi^2}}$, (5)

а мінімальне значення тиску \bar{p}_{\min} реалізується в точці з координатою $\bar{z} = 1 - 0,125u^2 = 1 - \frac{tg^2\beta}{2\pi^2}$. (6)

Надалі проаналізуємо аналогічну інформацію за теорією Г.В. Логвиновича.

Згідно роботи [5] розподіл безрозмірного тиску \bar{p} уздовж щокі клина під час вертикального занурення з постійною швидкістю V_y задля малих кутів кілеватості клину визначається наступною залежністю:

$$\bar{p} = \frac{2}{u\sqrt{1-\bar{z}^2}} - \frac{1}{1-\bar{z}^2} \quad (7)$$

або для випадку плоскокілеватого клина

$$\bar{p} = \frac{\pi}{tg\beta\sqrt{1-\bar{z}^2}} - \frac{1}{1-\bar{z}^2}. \quad (8)$$

Аналіз залежності (7) дає наступне: максимальне значення тиску

$$\bar{p}_{\max} = u^{-2} = \frac{\pi^2}{4tg^2\beta} \quad (9)$$

в точці з координатою

$$\bar{z} = 1 - \frac{u^2}{2} = 1 - \frac{2tg^2\beta}{\pi^2}, \quad (10)$$

а мінімальне значення тиску \bar{p}_{\min} реалізується в точці з координатою

$$\bar{z} = 1 - 0,125u^2 = 1 - \frac{tg^2 \beta}{2\pi^2}. \quad (11)$$

Порівняльний аналіз залежностей, які наведено, за двома теоріями показує, що величина \bar{p}_{\max} , яка отримується за теорією Д. Пірсона (4), відрізняється від аналогічної за теорією Г.В. Логвиновича (9) на дві одиниці, що складає відносно розходження результатів у діапазоні кутів кілеватості 10 – 60° від 5,5 до 71%. У цьому разі, на аналогічну величину відрізняються результати розподілу тисків \bar{p} (рис. 2) уздовж щоки клина в схожих точках за залежностями (3) та (8), де розрахунки виконано для плоскокілеватого клина з кутом $\beta = \frac{\pi}{8} = 22,5^\circ$, який дуже часто використовується в конструкції днищ човнів літальних апаратів (ЛА) ВБ.

Як видно з рис. 2, за результатами розрахунків розподілу тисків \bar{p} вздовж щоки клина за теоріями, які розглянуто, тиск за теорією Д. Пірсона наприкінці щоки прямує до нульового значення згідно роботи [9] в той час, коли за теорією Г.В. Логвиновича він там має від'ємне значення, яке не виявляється за результатами експериментальних досліджень.

У зв'язку з тим, що в разі аналізу локальної міцності, як правило, використовують максимальні значення тисків, які реалізуються під час взаємодії елементів днища човна ТЗ ВБ із водною поверхнею, на основі розрахункових даних, які отримано за залежностями (4) та (9) для \bar{p}_{\max} на рис. 3, наведено дані для основного діапазону значень кутів зовнішньої поперечної кілеватості β вздовж їхніх днищ.

З метою оперативного отримання даних, які наведено нижче, подано аналітичні апроксимаційні залежності (12) з метою розрахунку \bar{p}_{\max} згідно теорій Д. Пірсона та Г.В. Логвиновича відповідно:

$$\bar{p}_{\max} = 108,821 - 6,935\beta + 0,1654\beta^2 - 0,0016\beta^3, \quad (12)$$

$$\bar{p}_{\max} = 108,244 - 7,133\beta + 0,1749\beta^2 - 0,0018\beta^3$$

де кут β задається в градусах.

Слід зазначити, що всі аналітичні залежності, які подано вище, не враховують ефект подовжнього перетікання рідини на розподіл тисків, які існують реально.

З метою можливості поширення результатів рішення плоскої задачі на реальні компонування днищ надалі пропонується використати згідно робіт [1,6-8] метод плоских перетинів, сутність якого складається в аналогії між течіями в кожній площині під час глісирування тіла й занурення контура.

З метою наближеного урахування подовжнього перетікання рідини між перетинами для оцінки локального навантаження конструкції днища човна Г.В. Логвиновичем запропоновано використовувати відповідний коефіцієнт $\mu_{\beta\varphi}$ з роботи [5] для сталого глісирування

$$\mu_{\beta\varphi} = \left(1 + \frac{tg\beta\varphi^2}{u^2}\right)^{-2} = \left(1 + \frac{\pi^2\varphi^2}{4tg\beta}\right)^{-2}, \quad (13)$$

де φ – кут диферента лодки задається в радіанах; β – кут зовнішньої поперечної кілеватості в перетині.

Залежність, яку наведено (13), досить широко застосовується під час гідродинамічних розрахунків та надає можливість певним чином скорегувати результати гідродинамічних характеристик, які отримано. Саме цей коефіцієнт у якості множника пропонується використовувати у подальших дослідженнях.

Відомо, що у разі занурення в рідину контура, який має відповідну форму, виникає зустрічний рух вільної границі рідини завдяки підпорі (відношення висоти підйому рідини щодо нижньої точки профілю до глибини занурення нижньої точки контура W_F) за двома боками контура, що

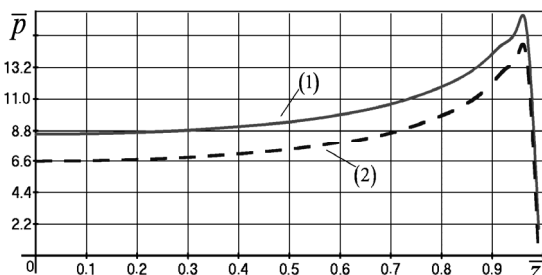


Рис. 2. Розподіл відносних тисків уздовж щоки клина з $\beta = 22,5^\circ$
1 – Д. Пірсон; 2 – Г.В. Логвинович

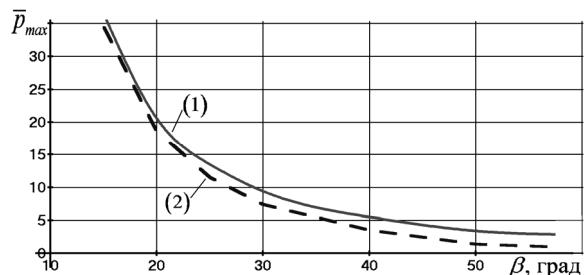


Рис. 3. Розподіл максимальних відносних тисків для клинів різної кілеватості
1 – Д. Пірсон; 2 – Г.В. Логвинович

переходить у бризкові струмені й створює додатковий силовий вплив згідно робіт [1-6], на контур, який заглиблюється.

Із цієї причини кількісна оцінка підпора безумовно необхідна з метою визначення гідродинамічних характеристик тіл під час занурення й глісування, в тому числі на початковій стадії (до замиву скул), коли мають місце максимальні гідродинамічні навантаження.

Г. Вагнером у роботі [3] було запропоновано апроксимаційну залежність форми вільної поверхні в разі замикання границі підбору в точках поверхні контура, який змочено, де можна знехатити дією бризкового струменя

$$y = h\left(\frac{z}{c} \arcsin\left(\frac{c}{z}\right) - 1\right), \quad (14)$$

де $c = \frac{\pi}{2} \frac{h}{\operatorname{tg}\beta}$ – напівдовжина плоскокілеватого контура, який змочено, з врахуванням значення теоретичного підбору рідини.

Для малих кутів кілеватості β й більших чисел Фруда F_r (наближення невагомої рідини) Г. Вагнером отримано теоретичне значення підбору в разі занурення плоскокілеватого профілю, яке дорівнює $W_F = 0,5\pi$. У роботах [1,5] подається припущення про сталість значення $0,5\pi$ для підбору в разі занурення в невагому рідину плоскокілеватих клинів до кутів кілеватості $\beta \leq 45^\circ$.

З фізичної точки зору очевидно, що величина W_F повинна залежати від форми контура, кута кілеватості (в разі β , який близький до $0,5\pi$, підбір повинен зникати, тобто $W_F = 1$).

У зв'язку з відзначеним неодноразово здійснювалися спроби уточнення величини W_F із урахуванням впливу різних факторів згідно робіт [9-11]. Однак дотепер ставляться під сумнів кількісні значення підбору для невагомої рідини, які уточнювалися після робіт Г. Вагнера.

В роботі [10] показано, що основними параметрами, які обумовлюють рух вільної поверхні рідини, для досить загального класу контурів, що включає типові форми шпангоутів корпусів швидкісних ТЗ ВБ, є коефіцієнт повноти площі χ і кут кілеватості β частини контура, який змочено, на рівні незбуреної вільної поверхні, а також швидкість занурення. В разі деякого співвідношення цих параметрів вагомість рідини може істотно впливати на рух вільної поверхні. Для конкретної геометрії контура існує мінімальне значення числа

Фруда за глибиною занурення Fr_h , під час якого ефект зустрічного руху рідини не спостерігається.

Далі наведено методуку, яка дозволяє уточнити кількісну оцінку підбору невагомої рідини в функції кута кілеватості для деякої базової форми контуру з використанням матеріалів згідно робіт [1,3,5,9-12] й урахуванням числа Fr_h , а також зміни коефіцієнта повноти площі χ контура й наступного визначення величини підбору під час занурення у вагому рідину контура довільної геометрії.

Значення підбору під час занурення в невагому рідину базового плоскокілеватого контура з кутами кілеватості $\beta < 85^\circ$ було отримано в результаті чисельного експерименту, за допомогою реалізації методом дискретних вихорів математичної моделі стосовно роботи [11] в нелінійній нестационарній постановці шляхом порівняння величин гідродинамічного навантаження, що розраховано й обмірювано.

На рис. 4 для різних кутів кілеватості β й коефіцієнта повноти площі контуру $\chi = 0,5$ (плоскокілеватий клин) на основі результатів робіт [11,12], які отримано, й узагальнення положень робіт [1,3,5,9,10] наведено залежність із метою визначення значень підбору W_{F_0} для невагомої рідини.

Рівняння для форми бортової поверхні за аналогією з (14) згідно роботи [3] отримано у вигляді

$$y = h\left(\frac{z}{c_1} \arcsin\left(\frac{c_1}{z}\right) - 1\right) \frac{c_1}{c}, \quad (15)$$

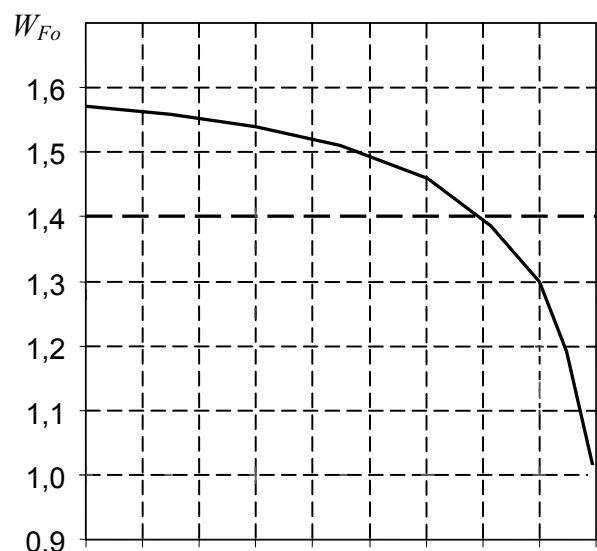


Рис. 4. Значення підборів W_{F_0} для контурів під час занурення в невагому рідину, коли $\chi = 0,5$

де $c_1 = W_F \frac{h}{tg\beta}$ коефіцієнт, який враховує підпір і геометрію контура; W_r – розрахунковий підпір рідини.

В залежності (15) замість теоретичного підпору, який описано в роботах [3, 10], беруться його уточнені значення, які розраховуються в наступному порядку.

Для поточного кута кілеватості β контура (на рівні незбуреної поверхні рідини) й коефіцієнта повноти його площі χ за залежністю (аналогічно тій, яку наведено на рис. 4) визначається поточне значення підпору W_{F_0} для невагомої рідини.

Для форми контура (шпангоута днища човна), який найчастіше зустрічається в практиці – плоскокілеватий, до кутів кілеватості $\beta \leq 75^\circ$ розрахунковий підпір рідини W_{F_0} за результатами роботи [12] (рис.4) може бути визначено з використанням полінома наступного виду:

$$W_{F_0} = \frac{\pi}{2} + 0,00332\beta - 0,11172\beta^2, \quad (16)$$

де β – кут кілеватості задається в радіанах.

З метою врахування впливу вагомості на ефект зустрічного руху рідини в методиці, яку запропоновано, використано рекомендації роботи [10]. У разі практичного використання підходу згідно цієї методики з графічного подання інформації, яку наведено на рис. 5, визначається значення коефіцієнта врахування впливу вагомості рідини v_g для конкретних параметрів контура.

Далі здійснюється розрахунок дійсного підпору рідини з використанням залежності

$$W_F = v_g W_{F_0}. \quad (17)$$

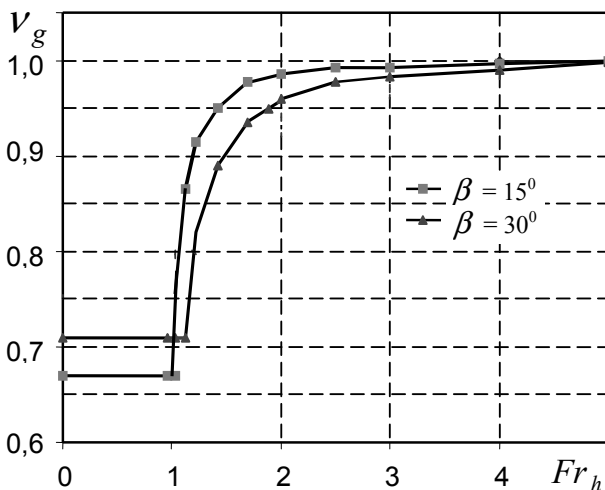


Рис. 5. Коефіцієнт впливу вагомості рідини в разі занурення контура

Результати, які отримано в такий спосіб, використовуються в рівнянні (15) в разі визначення геометрії зовнішньої вільної границі з метою наступних розрахунків гідродинамічних характеристик тіл під час їхнього занурення в рідину до замиву скул.

Крім того, з метою коригування результатів розрахунків розподілу тисків щодо поверхні контура, яку змочено, з врахуванням наведеного, необхідно величину u визначати для розглянутого випадку (плоскокілеватого клину), як

$$u = \frac{tg\beta}{W_F}. \quad (18)$$

На основі аналізу, який проведено, надалі пропонується за теорією Д. Пірсона використовувати аналітичні залежності розрахунків розподілу тисків за змоченим контуром, результати за якою більш прийнятні для їхнього подальшого використання на практиці.

Відповідно до роботи [8] значення тисків p (безрозмірних коефіцієнтів тиску \bar{p}) у будь-якій точці профілю днища човна, який глісирує, можна визначити таким чином:

$$\begin{aligned} P_{\mu_{\beta\varphi}} &= p\mu_{\beta\varphi}\varphi^2 \\ \bar{P}_{\mu_{\beta\varphi}} &= \bar{p}\mu_{\beta\varphi}\varphi^2 \end{aligned} \quad (19)$$

де $P_{\mu_{\beta\varphi}}, \bar{P}_{\mu_{\beta\varphi}}$, – значення тисків (коефіцієнтів тисків) у конкретних точках перетину з урахуванням подовжнього перетікання, яке обумовлено поступовою швидкістю руху; p, \bar{p} – значення відповідних параметрів, які визначено з (2-4) для конкретної геометрії контура.

Значення $P_{\mu_{\beta\varphi}}, \bar{P}_{\mu_{\beta\varphi}}$ у формулах (19) приведено до поступової швидкості руху V ТЗ ВБ

$$\bar{p} = \frac{2p\varphi^2}{\rho V_y^2}. \quad (20)$$

У формулах (19, 20) прийнято $\sin\varphi \approx \varphi$, зважаючи на невеликі значення експлуатаційних кутів диферента.

З метою можливості наступної оцінки локальної міцності елементів днищ човнів ТЗ ВБ за наявності вертикальної швидкості V_y пропонується в (19, 20) врахувати значення кута посадки θ . Припущення про малість кутів φ та θ в разі посадки на воду, як зазначено в роботах [7,8], дозволяє отримати такі залежності для $P_{\mu_{\beta\varphi}}, \bar{P}_{\mu_{\beta\varphi}}$:

$$\begin{aligned} P_{\mu_{\beta\varphi}} &= p\mu_{\beta\varphi} \\ \bar{P}_{\mu_{\beta\varphi}} &= \bar{p}\mu_{\beta\varphi} \end{aligned} \quad (21)$$

де $\alpha = \varphi + \theta$.

Як виходить з формули (21), в разі $\theta = 0^\circ$ ($V_y = 0$, режим глісування) формули (20) й (21) збігаються.

З метою врахування гідродинамічних характеристик під час хвилювання водної поверхні ТЗ ВБ пропонується на кінематичному рівні врахувати кут хвильового схилу в загальному значенні кінематичного параметру згідно роботи [13], який впливає на величину вертикальної швидкості V_y з рівняння для профіля циліндричної хвилі

$$y_e = \frac{h_e}{2} \sin \frac{2\pi}{\lambda_e} (x - x_{01}), \quad (22)$$

де y – ордината хвильової поверхні; x – поточна відстань від обраної точки відліку x_{01} ; λ_e, h_e – довжина хвилі та її висота відповідно.

В разі достатньо великої довжини хвилі ($\lambda_e/h_e \gg 1$), яка є характерною для реальної хвилі зибі, дозволено в розрахунках обмежуватися сталістю кута хвильового схилу α_a .

Наявність кута α_e призводить до зміни кінематичних параметрів, як-то: кута диферента φ й кута посадки (нахилу траєкторії) θ . Отже, в разі наведеного підходу фактично розглядається процес взаємодії днища човна ТЗ ВБ із похилою поверхнею рідини. За умовою можливих розв'язків задачі в такій постановці буде $\varphi = \alpha_e$, де φ – посадочний кут диферента.

Аналіз впливу кінематичних параметрів на максимальні навантаження згідно роботи [13] дозволяє зробити висновок, що найбільше гідродинамічне буде реалізовано в разі наявності максимального значення α_e для даного режиму руху $\alpha_{e, \max}$. Величину максимального кута хвильового схилу $\alpha_{e, \max}$ можливо отримати з рівняння регулярної циліндричної хвилі (22) шляхом його диференціювання

$$\alpha_{e, \max} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_e \pi}{\lambda_e} \cos \frac{2\pi}{\lambda_e} \right). \quad (23)$$

Тоді загальну величину кінематичного параметру α в рівнянні (21) може бути отримано у вигляді

$$\alpha = (\varphi + \theta + \gamma - \alpha_{e, \max}), \quad (24)$$

де γ – кут подовжньої кілеватості днища ТЗ ВБ.

З метою оцінки локальної міцності днищ човнів ТЗ ВБ та аналізу впливу різних кінематичних параметрів на їхнє навантаження в подальшому пропонується використовувати лише максимальні значення p, \bar{p} , які отримуються в розрахунках за залежностями (4 або 12), із врахуванням (13, 15-18, 21, 24).

Висновок

Аналіз та узагальнення матеріалу, який приведено в даній роботі, й запропонованого підходу дозволяють більш раціонально та оперативно підходити до питань вибору розрахункової силової схеми днищ човнів ТЗ ВБ під час їхнього проектування вже на початкових стадіях завдяки застосуванню вдосконаленого методичного апарата, що наведено, дати оцінки локальної міцності елементів конструкції, а також на основі результатів, які отримано, визначати експлуатаційний діапазон кінематичних параметрів із метою забезпечення безпеки їхньої експлуатації, що дуже важливо й актуально.

Список літератури

1. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течений со свободными границами. – К.: Наукова думка, 1969. – 209 с.
2. *Егоров И.Т., Буньков М.М., Садовников Ю.М.* Ходкость и мореходность глиссирующих судов. — Л.: Судостроение. — *Wagner H.* Uber Stoss-und Gleitvorgagne an der Oberflache von Flussigkeiten // ZAMM, 1932. — Н. 4. — Р. 193-215.
3. *Pierson J.D.* The penetration of a fluid surface by a wedge // J.D. Pierson // Inst. Aeronaut. — Science, 1950. — Rep. 381. — Р. 32.
4. *Логвинович Г.В.* Погружение профилей в жидкость, удар и глиссирование // Тр. ЦАГИ. — 1958. — Вып. 707. — 40 с.
5. *Косоуров К.Ф.* Теоретические основы гидроавиации. Гидромеханика гидросамолета. — М.: Воениздат, 1961. — 600 с.
6. *Соколов В.А.* О гидродинамической подъемной силе плоскокилеватых тел при движении с большими скоростями по волне // Сборник работ по гидродинамике / ЦАГИ. — М., 1959. — С. 183-210.
7. *Тихонов А.И.* Гидродинамические силы, действующие на плоскокилеватые пластины при неустановившемся глиссировании // Сборник работ по гидродинамике / ЦАГИ. — М., 1959. — С. 167-182.
8. *Vorus W.* A flat cylinder theory for vessel impact and steady planing resistance // Journal of Ship Research, 1996. — Vol. 40. — № 2. — Р. 89-106.
9. *Осипов О.А.* Определение гидродинамического давления при погружении контура в несжимаемую жидкость // Тр. ЦНИИ МФ, 1978. — Вып. 233. — С. 14-21.
10. *Zhao R., Faltinsen O.* Water entry two dimensional bodies // J. Fluid Mech. — 1993. — 246. — Р. 593-612.
11. *Майборода А.Н., Расстригин А.А.* Математические модели гидродинамики тел, пересекающих свободную поверхность жидкости // Наука и оборона — *Расстригин О.О.* Методика визначення підпору та форми вільної границі при зануренні контурів у рідину на неповну змочену конструктивну ширину / Зб. наук. праць ЦНДІ ОБТ ЗС України. — 2008. — № 21. — С. 123-128.
12. *Майборода О.М., Расстригин О.О., Кумпаненко В.М.* Деякі особливості реалізації нелінійної математичної моделі для розрахунку гідродинамічних характеристик днища літака-амфібії при посадці на регулярну хвилю зибі / Зб. наук. праць ЦНДІ ОБТ ЗС України. — 2001. — № 9. — С. 54-60.