УДК 629.5:004.421:539.4
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).4

THE METHOD OF OBTAINING OF THE STAGED DISTRIBUTION OF THE SHIP'S MASS OVER THEORETICAL SPACES BY THE ELEMENTS OF DETAILED LOADING ARTICLES

МЕТОДИКА ОТРИМАННЯ СТУПІНЧАТОГО РОЗПОДІЛУ МАС СУДНА ПО ТЕОРЕТИЧНИМ ШПАЦІЯМ ЗА ЕЛЕМЕНТАМИ ДЕТАЛІЗОВАНИХ СТАТЕЙ НАВАНТАЖЕННЯ

Valerii M. Sokov
valeriy.sokov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3933-879X

В. М. Соков,
канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose*. The purpose of this article is to present the developed methodology for obtaining of the stepwise distribution of masses over theoretical spaces based on the distribution of masses of elements over loading articles. *Methodology*. Analytical mathematical methods were used for developing of the specified methodology. *Results*. The developed methodology is adapted for working with both concentrated and distributed elements. The law of mass distribution of distributed elements is assumed to be linear, two parameters of which are determined from the available information about such components of the element as the beginning, end, position of the center of gravity along the vessel and mass. Thus, the law of distribution of a distributed element is a trapezoid, the area of which represents the total mass of this element. The presented methodology can be applied to an arbitrary number of spaces with their regular and irregular distribution along the vessel. Detailed theoretical principles of the methodology were demonstrated and the corresponding algorithm was developed, within the framework of which, according to the single sub-algorithm, information is processed for various options for the location of distributed elements relative to the boundaries of the spaces. The example of calculation using this methodology and its application for the real ship is shown, where high compliance of the results during verification was demonstrated. *Scientific novelty*. There is presented the proprietary algorithm for obtaining of a stepped longitudinal distribution of ship weight/masses for a given array of load-bearing element structures, which include extended and concentrated elements. The exception processing algorithm for degenerate trapezoids is proposed, in the case when the center of gravity exceeds 1/3 and 2/3 of the length of the distributed element. *Practical significance*. The presented methodology can be implemented in the form of software for using in shipbuilding design bureaus, avoiding the usage of expensive CAD and labor-intensive calculations using detailed drawings. The developed method can be developed for approximating of distributed masses according to nonlinear laws, but which depend on two parameters. The proposed methodology can be used independently or as a supplement to other methodologies.
Key words: weight/mass distribution; stepped distribution; space/station.

Анотація. *Мета*. Метою цієї статті є представлення розробленої методики отримання ступінчатого розподілу мас по теоретичним шпаціям за розподілом мас елементів по статтям навантаження. *Методика*. Для розроблення вказаної методики були застосовані аналітичні математичні методи. *Результати*. Розроблена методика пристосована до роботи як з концентрованими, так і з розподіленими елементами. Закон розподілу мас розподілених елементів приймається лінійним, два параметри якого визначаються з наявної інформації про такі складові елементу, як початок, кінець, положення центру ваги вздовж судна та маси. Таким чином законом розподілу розподіленого елементу є трапеція, площа якої представляє собою повну масу цього елементу. Представлена методика може бути застосована для довільної кількості шпацій при їх регулярному та нерегулярному розподілу вздовж судна. Були продемонстровані детальні теоретичні засади методики і розроблено відповідний алгоритм, в рамках якого за єдиним під-алгоритмом відбувається обробка інформації для різних варіантів розташування розподілених елементів відносно границь шпацій. Показано приклад розрахунку за даною методикою і її застосування для реального судна, де була продемонстрована висока відповідність результатів при перевірці. *Наукова новизна*. Представлено власний алгоритм отримання ступінчастого поздовжнього розподілу ваги/мас судна для заданого масиву структур елементів статей навантаження, які включають протяжні і кон-

центровані елементи. Запропоновано алгоритм обробки виключення для вироджених трапецій, у випадку, коли центр ваги виходить за межі 1/3 та 2/3 довжини розподіленого елементу. *Практична значимість*. Представлена методика може бути реалізована у вигляді програмного забезпечення для використання в суднобудівних проєктувальних бюро, уникаючи використання вартісних САПР і трудомістких розрахунків з використанням деталізованих креслень. Розроблена методика може бути розвинута для апроксимації розподілених мас і за нелінійними законами, але які залежать від двох параметрів. Запропонована методика може використовуватися самостійно, або слугувати доповненням до інших методик.
Ключові слова: розподіл ваги/мас; ступінчастий розподіл; шпація.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Отримання якомога точнішого ступінчатого розподілу мас судна по теоретичним шпаціям або теоретичного ступінчатого розподілу (мас) ще на стадіях проєктування або для вже готового судна є вкрай важливим при розрахунках судна, розглядаючи його в якості непризматичної балки. Вказані розрахунки дуже різноманітні і їх прикладами можуть бути:

а) удиферентовка судна на тихій воді і при статичній постановці на хвилю;

б) розрахунки міцності корпуса судна при побудові його на стапелі, постановці в сухий док, на залізничні візки або на будь-яку іншу основу тощо;

в) розрахунок міцності конструктивних опор, візків та інших подібних різноманітних фундаментів під судном під час побудови та ремонту;

г) розрахунки оптимального розташування кільблоків, залізничних візків та інших подібних елементів з метою отримання рівномірного розподілу маси судна на них;

д) розрахунок сумісного деформування судна і плавучого сухого доку при їх загальному згині, а також розрахунок місцевої міцності палуби сухого доку при постановці судна у сухий док;

е) розрахунок швидкості в'їзду судна у плавучий док і відповідної швидкості відкачування баластної води із танків плавучого доку;

ж) при розрахунках власних частот корпусу судна на воді, приймаючи його в якості безопорної непризматичної балки;

и) розрахунки при реноваціях суден із заміною конструктивних елементів зі збереженням центру ваги (ЦВ) судна;

к) розрахунок хитавиці і динаміки судна.

Як бачимо розподіл мас необхідний для розрахунків міцності, в питаннях теорії корабля і технології суднобудування. Наведений список може бути доповнений і розширений.

Точний теоретичний ступінчатий розподіл мас важко, а іноді неможливо отримати, маючи обмежену вихідну інформацію. Прямий розрахунок, приймаючи до уваги форми, маси, об'єми, центри ваги окремих конструктивних елементів потребує детальних креслень, є доволі складним і трудомістким, який займає багато часу, що є критичним при проєктуванні суден або розрахунках готового судна. Більш того, якщо сучасні системи автоматичного проєктування (САПР) для суден, такі як Maxsurf за посиланням [1], Aveva Marine за посиланням [2], Intergraph SmartMarine 3D (S3D), Nupas-Cadmatic за посиланням [3] і можуть вирішувати цю задачу, то доступність таких САПР є сумнівною для невеликих фірм за причини високої вартості ліцензій.

Постановка проблеми полягає в тому, щоб розробити швидкий спосіб отримання теоретичного ступінчатого розподілу мас задовільної точності, використовуючи доступну технічну документацію пов'язану з розподілом мас, уникаючи (по можливості) роботи з деталізованими кресленнями та використання вартісних САПР.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Означена тематика статті є доволі специфічною і їй присвячено небагато робіт. Так у статті [4] розглянуто те, як оцінюються вагові складові судна і представлені деталі, які стосуються взаємодії між існуючими ваговими даними і характеристиками нового проекту. Проте в статті [4] отримуються інтегральні характеристики, які втім можуть бути використані для перевірки характеристик вагового розподілу. В тезах конференції [5] представлені методи визначення поздовжнього розподілу ваги судна, на яких ми зупинимося більш детально.

В апроксимаційних методах, що представлені в тезах [5] для певних розділів або статей навантаження судна розроблені апроксимації, які є загальними і підходять лише для початкової стадії проєктування за причини їх низької вірності. А тому апроксимаційні методи нам не підходять.

Оригінальним методом групування є метод «відра» тез [5], який бере свою назву із того, що вагові деталі метафорично розміщуються у відрах, які розташовані у місцях своїх поздовжніх центрів ваги. Якщо лінія елементу поздовжнього центру ваги попадає в границі відра, то цей елемент включається в те відро. Для довгих елементів метод «відра» має обмежену точність [5]. До методів групування також відноситься метод шпацій [5], де використовується додаткове поле у записі ваги, що дозволяє калькулятору ваги вказати, чи знаходиться вага, представлена цією лінією (ваги), лише на шпації, на якій вона знаходиться, розподілена поміж кількома станціями навколо центру запису чи розподілена по всьому судну. Метод шпацій покращує якість розподілу ваги та зменшує обсяг переробки, необхідної для досягнення

ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

прийнятного розподілу. Слід зазначити, що це покращення лише маскує властивий цьому підходу недолік; воно не усуває його.

Цікавими є прямі методи розподілу, які наведені в тезах [5]. Фундаментальною представницькою формою прямих методів розподілу є трапеція. Представлення вагового запису в якості трапеції потребує знання ваги, поздовжньої протяжності та поздовжнього центру ваги. Вказаний метод обмежений тим, що центр ваги трапеції повинен лежати в її середній частині, не виходячи за межі 1/3 та 2/3 довжини трапеції, а інакше трапеція буде виродженою і складатиметься з двох трикутників. І замість додавання маси в потрібну шпацію матиме місце її віднімання [5]. Тому користувачам необхідно слідкувати за коректністю вихідних даних. Описаний прямий метод розподілу на основі трапеції буде прийнятий до уваги, тому що в нашому випадку вихідна інформація деталізованих статей навантажень містить такі складові, як масу, поздовжні координати початку, кінця і центру ваги. А закони розподілу деталізованих статей навантаження є невідомими. Є покращений метод прямого розподілу [5], який в якості апроксимуючих фігур поєднує трикутник і трапецію, у випадку, коли звичайна трапеція стає виродженою. Проте поєднання трикутника і трапеції не є строго описаним, а базується на припущеннях. Вказані прямі методи розподілу ваги реалізовані в програмному забезпеченні [6]. Тези конференцій [5] хоча і містить додаток, де у вигляді псевдокоду реалізовано описані прямі методи розподілу ваги, проте представлена інформація є загальною і не дозволяє відразу програмно реалізувати цей метод, що спонукає до розробки детальних залежностей і алгоритму методу.

Методи зведень [5] використовуються тоді, коли вимоги для прямих методів розподілу ваги, обговорені вище, не виконуються. Зазвичай це відбувається тому, що протяжності кожного запису не включені до бази даних або має місце обширного використання взаємозалежних полів. Ці проблеми перешкоджають прямому розрахунку розподілу ваги записа-записом. Методи зведень потребують взаємодії з користувачем при обробці інформації і досвіду, що є не зовсім прийнятним для нашого випадку. Методи зведень можуть бути корисними для великих фірм, де опрацьовуються багато проектів суден і таким чином може бути накоплений досвід.

У статті [7] представлено методику отримання поздовжнього вагового розподілу судна, змодельованого в “NASTRAN”, враховуючи лише структурні елементи, такі як балки та оболонки. Вплив решти елементів зі статей навантаження на розподіл поздовжньої ваги і на центр ваги судна реалізовано із залученням перетворення Гауса. Цей метод оперує з деталізованою 3D моделлю “NASTRAN”, на який у свою чергу потрібна вартісна ліцензія, що не завжди доступно для невеликих фірм.

Після огляду літератури стає зрозумілим, що на основі наявної інформації по деталізованим статтям навантаження методика отримання ступінчатого розподілу мас по теоретичним шпаціям повинна бути реалізована на основі прямого методу розподілу, який представлений в тезах [5], де розподіл маси по довжині статті апроксимований трапецією.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Однією з проблем є встановлення дійсного закону розподілу статті навантаження вздовж довжини судна. В цій роботі наведена детальна реалізація застосування лінійного закону розподілу і показана ідея застосування нелінійних залежностей для апроксимації статей навантаження, але у випадку, якщо нелінійні залежності залежать від двох коефіцієнтів. В тезах конференції [5] (та в пов’язаних з нею роботах) працюють лише з лінійними залежностями.

За неможливості встановлення вказаного дійсного закону розподілу, він приймається лінійним. Але за такого підходу може виникнути проблема виродженої трапеції, у випадку, коли її центр мас виходить за межі 1/3 та 2/3 її довжини. Ця проблема породжує появу від’ємних мас і спотворення кінцевих результатів розподілу мас вздовж довжини судна. В роботі буде запропоновано власний варіант вирішення вказаної проблеми.

В тезах [5] (та в пов’язаних з нею роботах) не наведено прикладу числової реалізації прямого методу розподілу, що би слугувало для кращого розуміння. А наведений псевдокод в тезах [5] не містить пояснень, що утруднює розуміння.

Наведені методики в тезах [5] прив’язані до лінійних законів, а розроблена методика є більш універсальною і може бути розвинена на випадок використання нелінійних залежностей для апроксимації статей навантаження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної статті є представлення розробленої методики отримання ступінчатого розподілу мас по теоретичним шпаціям за розподілом мас елементів по статтям навантаження, для того щоб відносно швидко отримати вказаний теоретичний ступінчатий розподіл мас задовільної точності у порівнянні з іншими існуючими методами.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) Проаналізувати інформацію щодо розподілу мас елементів та систематизувати цю інформацію з метою подальшої її обробки.

2) Розробити теоретичні основи та алгоритм методики врахування різних типів елементів при формуванні теоретичного ступінчатого розподілу мас.

Нижче представлені відповідні розділи, в яких вирішуються поставлені задачі.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методами дослідження є аналітичні математичні методи. Об'єктом дослідження є судно. Предметом дослідження є розподіл мас/ваги вздовж судна.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

1. Аналіз інформації щодо розподілу мас елементів. Аналізуючи технологічну документацію, яка стосується побудови судна можна відмітити, що елементи або детальні статті навантаження можна розділити на дві великі категорії. До першої категорії відносяться елементи, які представляють собою сконцентровану одиницю або точкову масу, яка характеризується визначеною масою і координатою встановлення по довжині судна. В цьому випадку розміри вказаного елементу менше розміру теоретичної шпації і вважається, що маса такого елементу повністю сконцентрована в точці. Прикладами першої категорії можуть бути різні механізми, редуктори, лебідки, швартовно-якорні пристрої, масивні одиниці типу якорів тощо. Що стосується головного двигуна, то він може бути протяжним і до виділеної першої категорії може бути і не віднесений. До другої категорії відносяться так звані розподілені елементи, які теж характеризуються певною масою, положенням центру ваги, початком і кінцем вздовж довжини судна. Довжина таких елементів повинна перевищувати довжину шпації. Прикладом розподілених елементів є, наприклад, пофарбування, протяжні конструктивні елементи, які складають корпус судна тощо.

На основі вищенаведеної класифікації елементів, які представляють собою деталізовані статті навантаження можна запропонувати наступну структуру, яка характеризуватиме вказані елементи

$$елемент_{КС} = \{m; x_G; x_{begin}; x_{end}; f(x)\}, \qquad (1)$$

де m – маса елементу статті навантаження, кг;

x_G – положення центру ваги елементу вздовж довжини судна, в загальній системі координат, пов'язаній з судном, м;

x_{begin} – початок елементу вздовж довжини судна, в загальній системі координат, пов'язаній з судном, м;

x_{end} – кінець елементу вздовж довжини судна, в загальній системі координат, пов'язаній з судном, м;

$f(x)$ – закон розподілу мас елементу в границях своєї довжини в загальній системі координат, пов'язаній з судном, кг/м.

У подальшому знадобиться структура, яка відображає теоретичну шпацію, і може бути реалізована наступним чином

$$шпация = \{x_1; x_2; m_ш\}, \qquad (2)$$

де x_1, x_2 – абсциси початку і кінця теоретичної шпації, які визначаються з координат теоретичних шпангоутів;

$m_ш$ – маса шпації.

Перед обробкою інформації щодо розподілу мас від деталізованих статей навантаження, спочатку формуємо масив *masSpaces* структур (2) «*шпація*», де всі маси $m_ш$ попередньо ініціалізовані в нуль. Кількість теоретичних шпацій і відповідно кількість елементів масиву *masSpaces* дорівнює $N_ш$.

При формуванні теоретичного ступінчатого закону розподілу, маса у межах кожної теоретичної шпації вважається постійною. Для кожної теоретичної шпації обчислюється повна маса, кг (не розподілена). Якщо потрібна розподілена маса в межах теоретичної шпації, то вона визначиться як відношення маси шпації до її довжини.

Також на основі технічної документації сформований масив *masElems* структур (1) «$елемент_{КС}$», кількість елементів якого становить N_e.

2. Розроблення методики.

2.1. Методика для точкової маси. Аналізуючи структуру (1) у випадку застосування для точкової маси можна зробити наступні висновки. Точкова маса не має протяжності, а тому для неї

$$x_G = x_{begin} = x_{end}, \qquad (3)$$

а $f(x) = 0$ і не використовується, тому що вся точкова маса, яка визначена в межах певної теоретичної шпації може бути цілком додана до вже наявної маси цієї теоретичної шпації. Якщо ж точкова маса лежить на спільній границі теоретичних шпацій, то ця маса повинна бути додана до однієї з теоретичних шпацій, які розділені спільною границею. Можливий варіант розділити цю точкову масу, наприклад, 50 % на 50 % (або 30 % на 70 %, 40 % на 60 % тощо, таких варіантів безліч, але щоб сума давала 100 %) по двом сусіднім шпаціям, які мають вказану спільну границю (де лежить точкова маса). Але, як показали пробні розрахунки, цілковите врахування точкової маси лише до однієї з теоретичних шпацій дає доволі точні результати. Більш того, випадки розташування точкових мас точно на границях теоретичних шпацій зустрічається значно рідше, аніж інші варіанти їх розташування.

Припустимо, що вже оброблена деяка кількість елементів статей навантаження і маси $m_ш$ в стуктурах масиву *masSpaces* мають деякі ненульові значення.

Якщо черговий елемент масиву *masElems* є точковою масою (нагадаємо, що маркером точкової маси є умова (3)), то точкова маса m структури (1) додається до маси $m_ш$ потрібної шпації з масиву *masSpaces* за умови

$$\left.\begin{array}{l} шпація.x_1 \le елемент_КС.x_G < шпація.x_2, \\ \text{або} \\ шпація.x_1 < елемент_КС.x_G \le шпація.x_2. \end{array}\right\} \qquad (4)$$

При програмній реалізації необхідно обрати лише одне рівняння з (4). Якщо x_G структури «$елемент_{КС}$» для точкової маси лежить на кормовому або носовому

перпендикулярі, то ця точкова маса включається до відповідної крайньої теоретичної шпації.

2.2. Методика для розподіленого елементу. Якщо маємо справу з розподіленим елементом, то для нього справедливо

$$x_{begin} < x_{end}, \tag{5}$$

а $f(x)$ повин11ен бути визначеним, тому що він задіяний в алгоритмі формування теоретичного ступінчатого розподілу (мас).

Проте проблемою є власне формування вказаного закону $f(x)$. В загальному випадку закон $f(x)$ є нелінійним і його точне встановлення для конкретного розподіленого елементу є в загальному випадку задачею трудомісткою, а іноді не вирішуваною, виходячи з наявної інформації, отриманої з конструкторської документації. Звісно є спроби апроксимації $f(x)$, які наведені в книгах [8, 9], але їх достовірність низька і вони розроблені для загальних усереднених випадків.

Пропонується закон $f(x)$ структури (1) для розподіленого елементу реалізувати у вигляді лінійної функції

$$f(x) = kx + b, \tag{6}$$

де k, b – поки невідомі коефіцієнти, які необхідно визначати з наявної інформації полів структури (1), тобто використовуючи відомі значення m, x_G, x_{begin}, x_{end}.

Як відомо закон прямої лінії можна задати за двома точками, використовуючи рівняння прямої лінії у відрізках

$$\frac{x - x_A}{x_B - x_A} = \frac{y - y_A}{y_B - y_A} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow y = \frac{(x - x_A)(y_B - y_A)}{x_B - x_A} + y_A = f(x), \tag{7}$$

де x_A, y_A, x_B, y_B – координати точок відповідно A і B (рис. 1).

Враховуючи (7), коефіцієнти закону прямої лінії (6) запишуться

$$k = \frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}, \quad b = y_A - \frac{x_A(y_A - y_B)}{x_A - x_B}. \tag{8}$$

Прив'язуючи рівняння (7) до структури (1) можна відмітити, що координата x_A відповідає координаті x_{begin}, а координата x_B – координаті x_{end}, тобто

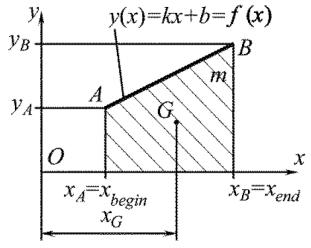


Рис. 1. Лінійний закон за двома точками

$$x_A = x_{begin}, \quad x_B = x_{end}. \tag{9}$$

Залишається встановити, яким чином визначаються y_A, y_B, фізичний зміст яких суть є значення розподілених мас на початку (при $x_A = x_{begin}$) та на кінці (при $x_B = x_{end}$) певного розподіленого елементу. В цьому випадку скористаємося наступними викладками.

Повна маса розподіленого елементу становить m, яка у свою чергу є інтегралом від функції $f(x)$ на відрізку $x \in [x_A, x_B]$ і геометрично представляє собою площу трапеції (рис. 1), тобто

$$\left.\begin{aligned} m &= \int_{x_A}^{x_B} f(x)dx = \frac{(x_B - x_A)(y_A + y_B)}{2} \Rightarrow \\ m &= \frac{(x_{end} - x_{begin})(y_A + y_B)}{2}, \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

де $f(x)$ визначений за (7).

Абсциса центру мас x_C трапеції, яка за фізичним змістом відповідає центру ваги розподіленого елементу x_G (тобто $x_C = x_G$) визначиться залежністю

$$\left.\begin{aligned} x_C = x_G &= \frac{\int_{x_A}^{x_B} f(x)\cdot x dx}{\int_{x_A}^{x_B} f(x)dx} = \frac{\int_{x_A}^{x_B} f(x)\cdot x dx}{m} = \\ &= \frac{(2x_A + x_B)y_A + y_B(x_A + 2x_B)}{3(y_A + y_B)} \Rightarrow \\ x_G &= \frac{(2x_{begin} + x_{end})y_A + y_B(x_{begin} + 2x_{end})}{3(y_A + y_B)}. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Вирішуючи сумісно систему рівнянь (10) і (11) знайдемо невідомі y_A, y_B, виражені через відомі m, x_G, x_{begin}, x_{end}, тобто

$$\left.\begin{aligned} m &= \frac{(x_{end} - x_{begin})(y_A + y_B)}{2}, \\ x_G &= \frac{(2x_{begin} + x_{end})y_A + y_B(x_{begin} + 2x_{end})}{3(y_A + y_B)}. \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \left.\begin{aligned} y_A &= \frac{2m(x_{begin} + 2x_{end} - 3x_G)}{(x_{begin} - x_{end})^2}, \\ y_B &= -\frac{2m(2x_{begin} + x_{end} - 3x_G)}{(x_{begin} - x_{end})^2}. \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Таким чином для певного розподіленого елементу, закон $f(x)$ структури (1), який заданий законом прямої лінії (7) або (6) з параметрами (8) є цілком визначений через відомі параметри m, x_G, x_{begin}, x_{end} структури (1). Отже закон $f(x)$, який заданий у формі (6) або (7), з врахуванням (9) і (12), виражений через відомі m, x_G, x_{begin}, x_{end} структури (1), в кінцевому вигляді запишеться так

$$\left.\begin{aligned} &f(x)=kx+b,\\ &k=\frac{y_A-y_B}{x_{begin}-x_{end}},\quad b=y_A-\frac{x_{begin}(y_A-y_B)}{x_{begin}-x_{end}},\\ &y_A=\frac{2m(x_{begin}+2x_{end}-3x_G)}{(x_{begin}-x_{end})^2},\\ &y_B=-\frac{2m(2x_{begin}+x_{end}-3x_G)}{(x_{begin}-x_{end})^2}. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

Маючи визначений закон $f(x)$, необхідно розробити методику його застосування при формуванні теоретичного ступінчатого закону розподілу мас. Функція $f(x)$ структури (1) визначає закон розподіленої маси, кг/м, і очевидно, що інтеграл від $f(x)$ на певному відрізку $x \in [x_a, x_b]$, який визначений в межах довжини судна, де $x_a < x_b$, визначає повну масу на цьому відрізку. Якщо вказані координати x_a і x_b є границями теоретичної шпації, то інтеграл на цьому відрізку становитиме масу, яка додасться до вже наявної маси в межах цієї теоретичної шпації від певного розподіленого елементу, який визначений структурою (1), де відомий закон $f(x)$.

Маса m_{ab}, яка визначена на відрізку $x \in [x_a, x_b]$ для розподіленого елементу визначиться залежністю (рис. 2)

$$m_{ab}=\int_{x_a}^{x_b} f(x)dx=\int_{x_a}^{x_b}(kx+b)dx= \\ =\frac{kx^2}{2}+bx\Big|_{x=x_a}^{x=x_b}=\left(\frac{1}{2}k\left(x_b+x_a\right)+b\right)\left(x_b-x_a\right), \quad (14)$$

де $f(x)$, k, b визначені (13).

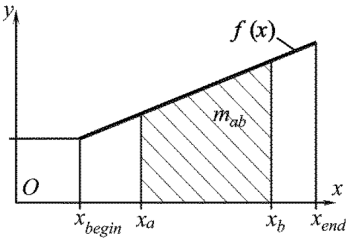


Рис. 2. Маса m_{ab} на відрізку $x \in [x_a, x_b]$

При розробці алгоритму розподілу мас від розподіленого елементу по теоретичним шпаціям необхідно прийняти до уваги декілька випадків розташування $f(x)$ відносно границь шпацій (рис. 3). Нехай границі деякої теоретичної шпації визначені координатами x_1, x_2, де $x_1 < x_2$ (рис. 3). Тоді випадки розташування $f(x)$ відносно границь шпацій можуть сформульовані таким чином:

1-й випадок (рис. 3, *а*) – це коли закон $f(x)$ повністю лежить в межах шпації і щоб знайти масу, яка додасться до вже наявної маси цієї теоретичної шпації, необхідно взяти інтеграл від $f(x)$ в межах $x \in [x_1, x_2]$, тобто обчислити m_{ab} від (14) при $x_a = x_1$, $x_b = x_2$;

2-й випадок (рис. 3, *б*) – це коли закон $f(x)$ починається в межах відрізку теоретичної шпації, а закінчується на її границі і щоб знайти масу, яка додасться до вже наявної маси цієї теоретичної шпації, необхідно взяти інтеграл від $f(x)$ в межах $x \in [x_{begin}, x_2]$, тобто обчислити m_{ab} від (14) при $x_a = x_{begin}$, $x_b = x_2$;

3-й випадок (рис. 3, *в*) подібний до попереднього, але закон $f(x)$ починається на границі шпації, а закінчується в її межах і щоб знайти масу, яка додасться до вже наявної маси цієї теоретичної шпації, необхідно взяти інтеграл від $f(x)$ в межах $x \in [x_1, x_{end}]$, тобто обчислити m_{ab} від (14) при $x_a = x_1$, $x_b = x_{end}$;

4-й випадок (рис. 3, *г*) – це коли закон $f(x)$ повністю лежить в межах відрізку теоретичної шпації, не включаючи її границі і щоб знайти масу, яка додасться до вже наявної маси цієї теоретичної шпації, необхідно взяти інтеграл від $f(x)$ в межах $x \in [x_{begin}, x_{end}]$, тобто обчислити m_{ab} від (14) при $x_a = x_{begin}$, $x_b = x_{end}$.

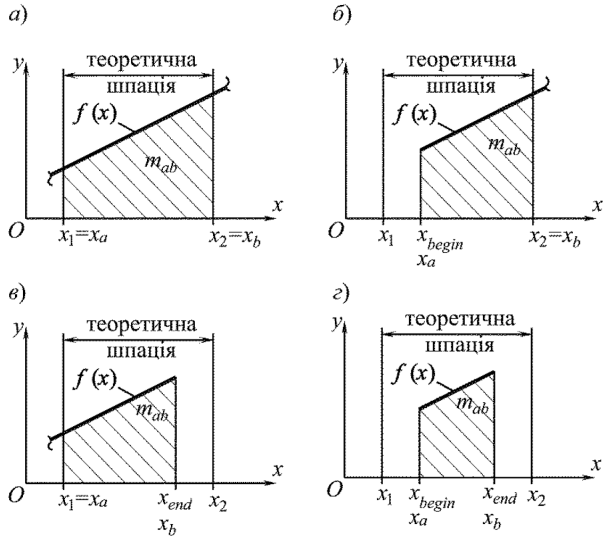


Рис. 3. Закон $f(x)$ відносно границь теоретичних шпацій: *а* – для 1-го випадку; *б* – для другого випадку; *в* – для третього випадку; *г* – для четвертого випадку

Хоча розподілений елемент для 4-го випадку і має визначений закон $f(x)$, то цей елемент можна віднести до точкової маси. Але не буде помилкою вважати цей елемент розподіленим. В останньому випадку буде більше обчислень. При формулюванні вищенаведених випадків вважається, що абсциси відраховуються зліва направо.

При програмній реалізації врахування вищенаведених 4-х випадків спричинить створення громіздких алгоритмів, де додасться проблема на границях, коли границі x_{begin} і/або x_{end} можуть співпадати з границями теоретичних шпацій x_1 і/або x_2 і додатково виникне питання про строгі і нестрогі рівності при віднесенні

різних абсцис до тієї чи іншої шпації. А співпадіння x_{begin} і/або x_{end} з границями теоретичних шпацій часто трапляється на кормовому і носовому перпендикулярах, але також і всередині довжини судна може мати місце.

Аналізуючи вищенаведені чотири випадки можливо створити єдиний алгоритм розподілу мас по теоретичним шпаціям від певного розподіленого елементу, визначеного структурою (1), де заданий закон $f(x)$.

Припустимо, що вже оброблена деяка кількість елементів статей навантаження і маси $m_ш$ в стуктурах масиву *masSpaces* мають деякі ненульові значення.

Розглядаємо певний розподілений елемент, масу якого необхідно розподілити по потрібним шпаціям. Він визначений структурою (1), де відомо: m, x_G, x_{begin}, x_{end}. За відомими m, x_G, x_{begin}, x_{end} встановлюємо $f(x)$ за (13). Наступним етапом є формування масиву абсцис (який йменуватимемо *masx*), в якому початковим елементом масиву є x_{begin}, а кінцевим – x_{end}. До вказаного масиву включають абсциси границь теоретичних шпацій, тобто абсциси теоретичних шпангоутів, які лежать між x_{begin} і x_{end}, в т.ч. і на самих x_{begin} і x_{end}. З отриманого масиву *masx* видаляють копії і сортують у висхідному порядку. Покладемо, що кількість елементів масиву *masx* дорівнює N. Визначимо структуру

$$\left.\begin{array}{l} відрізок = \left\{\begin{array}{l} x_I = masx_i;\ x_{II} = masx_{i+1}; \\ x_{mid} = \dfrac{x_I + x_{II}}{2};\ m_в;\ i \end{array}\right\}, \\ i \in [1, N-1];\quad m_в = m_{ab}\ при\ x_a = x_I, x_b = x_{II}. \end{array}\right\} \quad (15)$$

де i – індекс, який лежить в межах $i \in [1, N-1]$;

$m_в$ – масса, визначена залежністю (14), в межах відрізку x_I, x_{II}, покладаючи: $x_a = x_I$, $x_b = x_{II}$. В практичній програмній реалізації індекс «i» в структурі (15) є надлишковим, але там він показаний, щоб було очевидно, які елементи масиву *masx* задіяні при формуванні полів структури (15).

Потім з масиву *masx* формується масив *masSegms* структур (15) «*відрізок*», при поступовому проходженні індексу «i» значень від 1 до $N-1$. При поступовому переборі масивів *masSegms* і *masSpaces* в рамках вкладеного циклу маси $m_в$ з певних елементів масиву *masSegms* додаються до мас $m_ш$ певних елементів масиву *masSpaces*. Вказане додавання мас відбувається за умови, якщо поле x_{mid} структури «*відрізок*» знаходиться між абсцисами x_1, x_2 структури «*шпація*», тобто коли

$$шпація\ x_1 < відрізок\ x_{mid} < шпація\ x_2. \quad (16)$$

Вищевказаний перебір масивів можна представити алгоритмом у вигляді псевдокоду

$$\left.\begin{array}{l} for\ i = 1\ to\ i = N-1 \\ \quad for\ j = 1\ to\ j = N_ш \\ \quad\quad if\ (masSpaces[j].x_1 < masSegms[i].x_{mid} < \\ \quad\quad\quad < masSpaces[j].x_2) \\ \quad\quad\quad masSpaces[j].m_ш = masSpaces[j].m_ш + \\ \quad\quad\quad\quad + masSegms[i].m_в \end{array}\right\}. \quad (17)$$

Після виконання псевдокоду (17) розподілена маса $f(x)$ одного певного розподіленого елементу повністю розподілиться по потрібним теоретичним шпаціям.

2.3. Загальний алгоритм методики. На основі вищевикладених міркувань щодо розподілу мас елементів статей навантаження по шпаціям можна представити наступний алгоритм.

1) На основі технічної і технологічної документації створити масив *masElems* структур (1) «*елемент*$_{КС}$», кількість елементів якого становить N_e. Ознакою точкової маси є умова (3). Якщо умова (3) не виконується – то це розподілений елемент, для якого $f(x)$ визначається за (13). При цьому необхідно перевірити, щоб y_A і/або y_B із (13) не були від'ємними, тобто щоб центр ваги розподілених елементів лежав між 1/3 та 2/3 довжини розподіленого елементу.

Якщо ні, то по можливості необхідно розділити розподілений елемент на зрозумілі складові, таким чином, щоб згадані y_A і/або y_B не були від'ємними.

Також, якщо згадані y_A і/або y_B є від'ємними, то можливо прийняти закон розподілу маси у вигляді трикутника, площа якого дорівнює масі розподіленого елементу. В цьому випадку необхідно прийняти наступні параметри трикутника. Якщо центр ваги x_G лежить лівіше 1/3 довжини розподіленого елементу, то y_A і y_B обчислюємо за (13), приймаючи, що центр ваги лежить на 1/3 довжини, де очевидно, що $y_B = 0$. Якщо ж центр ваги x_G лежить правіше 2/3 довжини розподіленого елементу, то y_A і y_B обчислюємо за (13), приймаючи, що центр ваги лежить на 2/3 довжини, де очевидно, що вже $y_A = 0$. Але дійсне положення центру ваги залишаємо без змін.

2) На основі конструкторської документації створити масив *masSpaces* структур (2) «*шпація*», кількість елементів якого становить $N_ш$, де всі маси $m_ш$ попередньо ініціалізовані в нуль.

3) Послідовно перебираємо масив *masElems* з метою включення або розподілу маси того чи іншого елементу до потрібної теоретичної шпації, виконуючи пункти 4–5 цього алгоритму для кожного елементу масиву *masElems*.

4) Якщо черговий елемент масиву *masElems* є точковою масою, то точкова маса m структури (1) додається до маси $m_ш$ потрібної шпації з масиву *masSpaces* за умови (4). При чому, якщо точкова маса лежить на

кормовому або на носовому перпендикулярі, то необхідно передбачити її включення до відповідної крайньої теоретичної шпації.

5) Якщо черговий елемент масиву *masElems* є розподіленим елементом, то послідовність дій наступна.

5.1) Формуємо масив абсцис *masx*, кількість елементів якого становить N, який містить абсциси x_{begin}, x_{end} та координати теоретичних шпангоутів між ними. Видаляємо з масиву *masx* можливі копії та сортуємо його у висхідному порядку.

5.2) На основі масиву *masx* формуємо масив *masSegms* структур (15) «*відрізок*», кількість елементів якого становить $N - 1$, як про це було повідомлено вище.

5.3) Виконуємо алгоритм (17).

6) Після перебору всіх елементів масиву *masElems* виконуємо наступні перевірки.

6.1) Виконати перевірку суми мас. Тут необхідно пересвідчитися, що сумарна маса всіх теоретичних шпацій дорівнює сумарній масі всіх елементів деталізованих статей навантаження, тобто виконується умова

$$\sum_{i=1}^{i=N_ш} masSpaces[i] = \sum_{j=1}^{j=N_e} masElems[j]. \qquad (18)$$

6.2) Виконати перевірку центрів ваги. Ще однією ознакою правильності виконаних розрахунків є перевірка співпадіння центрів ваги судна, обчислених з використанням інформації з масиву *masElems* та інформації з масиву *masSpaces*. Тобто повинна виконуватися умова

$$\left.\begin{aligned} & x_G^{шп} \cong x_G^{елем}, \\ & x_G^{шп} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_ш} \left(masSpaces[i].m_ш \times \right.}{\sum_{i=1}^{i=N_ш} masSpaces[i].m_ш} \left. \times \frac{masSpaces[i].x_1 + masSpaces[i].x_2}{2} \right); \\ & x_G^{елем} = \frac{\sum_{j=1}^{j=N_e} \left(masElems[j].m \cdot masElems[j].x_G \right)}{\sum_{j=1}^{j=N_e} masElems[j].m}. \end{aligned}\right\} \qquad (19)$$

Щодо (19) слід сказати, що $x_G^{шп}$ та $x_G^{елем}$, в загальному випадку не є рівними між собою. Значення $x_G^{елем}$ вважається точним, а припущення ступінчатого розподілу дещо спотворює інформацію, але як буде показано нижче – на зовсім небагато. При збільшенні числа теоретичних шпацій, різниця між $x_G^{шп}$ та $x_G^{елем}$ буде прагнути до нуля.

Враховуючи накоплення похибок в ЕОМ при обчисленнях і представленнях даних, допустимо, що праві і ліві частини у (18) можуть відрізнятися на малу величину.

3. Обговорення отриманих результатів. В цьому пункті буде показаний приклад розрахунку за розробленою методикою для простого гіпотетичного судна, а також будуть представлені результати розрахунків для реального судна. В рамках представлених результатів буде проаналізовано і обговорено точність розробленого методу за обраними контрольними інтегральними показниками.

3.1. Приклад застосування методики. Покажемо застосування розробленої методики на прикладі. Мається гіпотетичне судно з 5-ма теоретичними шпаціями на рис. 4.

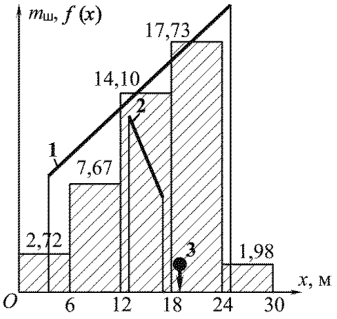


Рис. 4. Приклад розподілу мас по теоретичним шпаціям

Далі по пунктам представлено виконання алгоритму.

1) Масив *masElems* представлено в табл. 1, кількість елементів якого становить $N_e = 3$, де $f(x)$ визначено за (13).

Таблиця 1. Масив *masElems* елементів деталізованих статей навантаження

№	Назва	m	x_G	x_{begin}	x_{end}	$f(x)$
1	Елемент 1	32,6	15,4	3,5	25	$0{,}045x + 0{,}871$
2	Елемент 2	4,8	14,8	13,0	17,0	$-0{,}180x + 3{,}9$
3	Елемент 3	6,8	19,0	19,0	19,0	–

2) Масив *masSpaces* представлено в табл. 2, кількість елементів якого становить $N_ш = 5$.

Таблиця 2. Масив шпацій

№	x_1, м	x_2, м	$m_ш$, т	
			до	після
I	*II*	*III*	*IV*	*V*
1	0	6,0	0	2,72
2	6,0	12,0	0	7,67
3	12,0	18,0	0	14,10
4	18,0	24,0	0	17,73
5	24,0	30,0	0	1,98
Σ				44,2

На основі табл. 2 масив абсцис теоретичних шпангоутів *masxfr* становить

$$masxfr = [0;\ 6{,}0;\ 12{,}0;\ 18{,}0;\ 24{,}0;\ 30{,}0]. \qquad (20)$$

3) Послідовно перебираємо елементи масиву *masElems.*

Елемент 1 з табл. 1 є розподіленим елементом, а тому до нього застосовуємо пункт 5 алгоритму розробленої методики.

Згідно п. 5.1 алгоритму формуємо масив абсцис *masx*, включаючи в нього абсциси теоретичних шпангоутів, які лежать між $x_{begin} = 3{,}5$ м і $x_{end} = 25$ м. Масив *masx* виглядає таким чином

$$masx = [3{,}5;\ 6{,}0;\ 12{,}0;\ 18{,}0;\ 24{,}0;\ 25{,}0], \qquad (21)$$

кількість елементів якого становить $N = 6$.

Згідно п. 5.2, на основі масиву *masx* з (21) формуємо масив *masSegms* структур «*відрізок*», кількість елементів якого становить $N - 1 = 5$. Масив *masSegms* структур «відрізок» представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Масив *masSegms* для *Елементу 1*

№, *i*	x_I, м	x_{II}, м	x_{mid}, м	$m_в$, т
1	3,5	6	4,75	2,72
2	6	12	9	7,67
3	12	18	15	9,30
4	18	24	21	10,93
5	24	25	24,5	1,98
Σ				32,6

Згідно п. 5.3, виконуємо алгоритм (17). Пояснимо декілька ітерацій. Розглядаємо 1-й елемент масиву *masSegms*, де $x_{mid} = 4{,}75$ м попадає між границями $x \in [x_1 = 0,\ x_2 = 6]$ 1-ї теоретичної шпації (табл. 2), а тому маса $m_в = 2{,}72$ т цього 1-го елементу додається до маси 1-ї теоретичної шпації. Наприклад, 4-й елемент масиву *masSegms*, де $x_{mid} = 21$ м попадає між границями $x \in [x_1 = 18,\ x_2 = 24]$ 4-ї теоретичної шпації (табл. 2), а тому маса $m_в = 10{,}93$ т цього 4-го елементу додається до маси 4-ї теоретичної шпації. Аналогічно для решти елементів масиву *masSegms*.

Елемент 2 з табл. 1 є розподіленим елементом, а тому до нього застосовуємо пункт 5 алгоритму розробленої методики. Згідно п. 5.1 алгоритму для *Елемент 2* формуємо:

$$masx = [13;\ 17]. \qquad (22)$$

Як бачимо *Елемент 2* цілком лежить в межах 3-ї теоретичної шпації і не містить абсцис теоретичних шпангоутів.

Масив структур «*відрізок*» представлено в табл. 4.

Таблиця 4. Масив *masSegms* для *Елементу 1*

№	x_I, м	x_{II}, м	x_{mid}, м	$m_в$, т
1	13	17	15	4,8
Σ				4,8

Згідно п. 5.3, виконуємо алгоритм (17), в результаті чого до маси 3-ї теоретичної шпації додасться цілком маса $m_в = 4{,}8$ т *Елементу 2*. До речі *Елемент 2* можна було б вважати точковим.

Елемент 3 з табл. 1 є точковою масою, а тому до нього застосовуємо пункт 4 алгоритму розробленої методики. Маса $m_в = 6{,}8$ т *Елементу 3* цілком додасться до маси 4-ї теоретичної шпації.

Таким чином після перебору всіх елементів масиву *masElems* матимемо наступний розподіл мас по шпаціям, який представлено в табл. 2, в колонці *V*. Що стосується перевірок п. 6 алгоритму, то (18) виконується точно, а для (19) маються такі числа: $x_G^{шп} = 16{,}17$ м, $x_G^{елем} = 15{,}89$ м, , різниця між якими становить 1,7 %, що є прийнятним навіть для такої малої кількості шпацій.

3.2. Демонстрація застосування розробленої методики для реального судна. За розробленою методикою були отримані ступінчаті розподіли мас малого судна для трьох розрахункових станів (РС), які у подальшому були використані для розрахунку загальної міцності і вібрації судна. Довжина судна між перпендикулярами $L = 29{,}7$ м, вздовж якої виділено 27 однакових теоретичних шпацій. В табл. 5 показані обрані елементи для демонстрації з близько 220 для вказаного реального судна для РС№ 1. Якщо в колонах «початок елементу», «кінець елементу» одночасно не заповнені ячейки, то це означає, що елемент є точковою масою і виконується (3).

Таблиця 5. Приклади елементів судна для РС № 1

№ з/п	Назва деталізованої статті навантаження або елементу	Маса елементу m, т	Абсциса центру ваги x_G, м	Початок елементу, x_{begin}, м	Кінець елементу, x_{end}, м
	Судно порожнем				
3	Секція 2014(2013)	19,6	7,5	4,65	10,7
4	Секція 2012(2011)	19,6	7,8	4,65	10,7
12	Секція 4001 Основна надбудова	14,8	19,57	11	23,65
14	Секція 4011 Рубка	4,3	17,3	14,85	19,856
15	Зовнішня обшивка	62	15,295	0	29,7
18	Фальшборт	12,5	16,6	0	29,7
19	Фундаменти	12	16,334	0	29,7
20	Зварювання	3,5	16,6	0	29,7
21	Дільні речі	9,36	14,84	14,85	23,65
23	Мастика	2,94	20,15	14,85	23,65
26	Фарбування	2,73	15,29	0	29,7

Закінчення табл. 5

№ з/п	Назва деталізованої статті навантаження або елементу	Маса елементу m, т	Абсциса центру ваги x_G, м	Початок елементу, x_{begin}, м	Кінець елементу, x_{end}, м
27	Ізоляція	4,75	16,27	14,85	23,65
28	Зашивки	8,99	19,92	14,85	23,65
29	Устаткування приміщень, постів	5,4	20,87	14,85	23,65
30	Якоря станові ПДС 360	0,72	28,1		
31	Якорні ланцюги 19мм (275 м)	2,25	26,6		
36	Лебідка носова	12	26,1	25,3	27,5
37	Бітенг кормовий	4,5	10,56	9,9	10,725
38	Лебідка кормова	17	12,65	11,55	13,475
39	Бітенг носовий	3	28,42	28,05	28,6
43	Рятувальні плоти з кріпленням	0,49	15,88		
44	Кран гідравлічний	1,81	10,74		
45	Шлюпка с ложементами	0,15	13,05		
46	Кранець носовий	5,9	28,1	23,1	29,7
47	Кранець бортовий	2,95	13,82	4,4	23,1
48	Кранець кормовий	2,42	1,15	0	4,4
71	Допоміжний дизель-генератор D9A MG HE (ВДГ) № 1 Nэл.=168 кВт	2,48	9,35	7,7	10,45
72	Допоміжний дизель-генератор D9A MG HE (ВДГ) № 1 Nэл.=168 кВт	2,48	9,35	7,7	10,45
73	Головний двигун (ГД) № 1, 12V4000M53 Ne=1380 кВт	7,774	14,1	12,375	15,4
74	Головний двигун (ГД) № 2, 12V4000M53 Ne=1380 кВт	7,774	14,1	12,375	15,4
75	Гвинторулева колонка (ВРК) № 1 US 205P20 CP с гвинтом регульованого кроку Ø 2200 мм	16,5	3,56	2,2	4,95
76	Гвинторульова колонка (ВРК) № 2 US 205P20 CP з гвинтом регульованого кроку Ø 2200 мм	16,5	3,56	2,2	4,95
151	Валопровід ВРК№ 1 з опорними підшипниками	0,76	8,75	4,675	12,1
152	Валопровід ВРК№ 1 з опорними підшипниками	0,76	8,75	4,675	12,1
174	Головні, аварійні розподільні щити	1	17,3		
175	Щити розподільні	0,24	17,4		
176	Кабель	0,8	16,4		
182	Дистанційне і автоматичне управління засобами, системами	0,72	14,4		
183	Внутрішньосудновий зв'язок та управління	0,46	17,1		
184	Кріпильні деталі, монтажний матеріал	3,7	16,5	0	29,7
187	Навігаційне озброєння	0,85	17,8		
191	Піноутворювач	5,8	15,1	14,3	15,95
	…				
	Маса судна порожнем, т	**468,045**			
	Змінні вантажі				
203	Цистерна палива FO-1 ПрБ	17,55	19,87	18,15	22
204	Цистерна палива FO-2 ЛБ	11,6	19,81	18,15	22
206	Цистерна палива FO-3 ПрБ	22,95	9,62	7,15	11,55
207	Цистерна палива FO-4 ЛБ	9,35	7,05	4,95	8,8
213	Цистерна баластна	10	27,85	26,95	29,7
214	Екіпаж	1,52	21,65		
215	Провізія	0,87	21,4		
217	Цистерна піноутворювача FF ДП	6,93	15,13	14,3	15,95
	…				
	Сумарна маса судна, т	**588,085**			

ISSN 3154-8245 (print), 3154-8253 (online)

Ступінчатий розподіл мас для трьох РС представлений на рисунках 5, 6, 7.

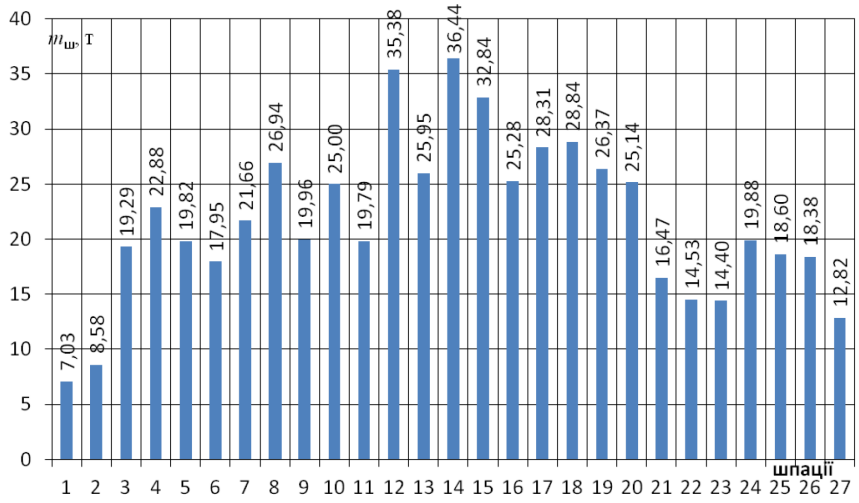


Рис. 5. Ступінчатий розподіл мас судна для РС№ 1

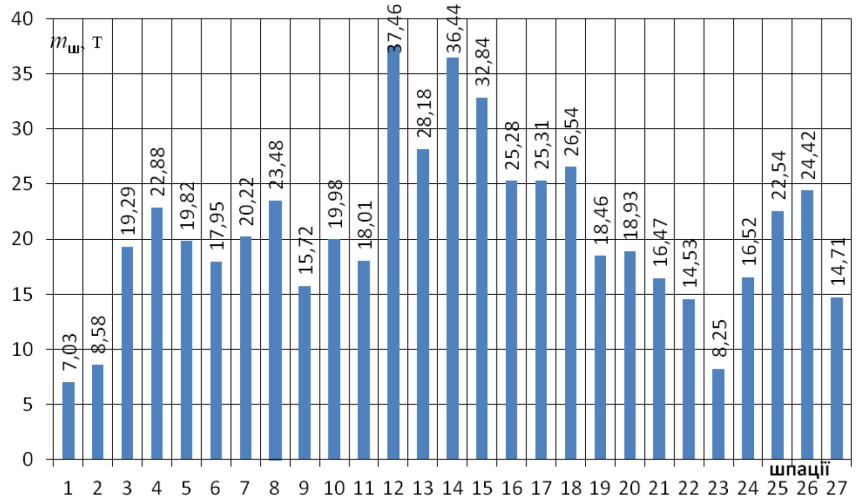


Рис. 6. Ступінчатий розподіл мас судна для РС№ 2

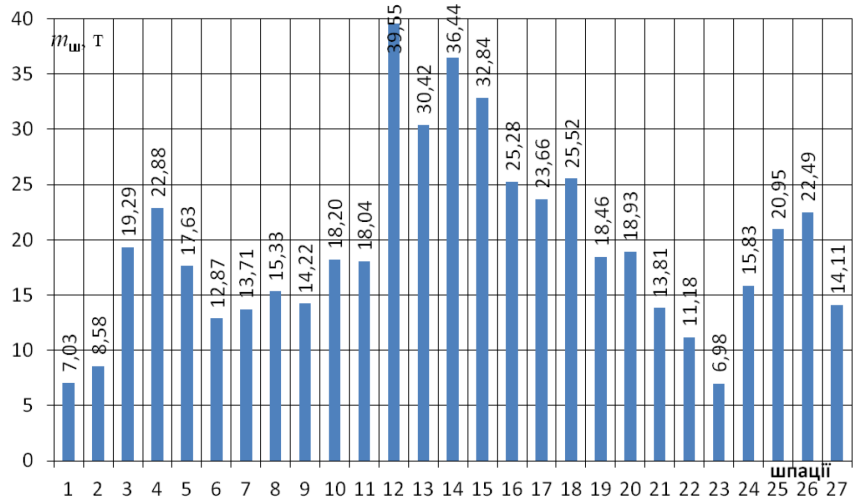


Рис. 7. Ступінчатий розподіл мас судна для РС№ 3

Таблиця 6. Перевірки

№	РС	Дані з поелементного розподілу мас (типу з табл. 5)		Дані з розподілу мас по теоретичним шпаціям (рис. 5, 6, 7)		Різниця, %	
		ЦВ $x_G^{елем}$, м	Повна маса судна $M_{судна}^{елем}$, т	ЦВ $x_G^{шп}$, м	Повна маса судна $M_{судна}^{шп}$, , т	для ЦВ ε_x	для повних мас судна ε_M
I	*II*	*III*	*IV*	*V*	VI	*VII*	*VIII*
1	РС№ 1	15,028	588,085	15,021	588,505	0,047	0,071
2	РС№ 2	15,095	559,435	15,084	559,855	0,068	0,075
3	РС№ 3	15,196	523,795	15,188	524,215	0,058	0,080

В табл. 6 представлені перевірки за формулами (18), (19), де величини ε_x, ε_M обчислювались за виразами

$$\varepsilon_x = \left|\frac{x_G^{елем} - x_G^{шп}}{x_G^{елем}}\right| 100\,\%, \quad \varepsilon_M = \left|\frac{M_{судна}^{елем} - M_{судна}^{шп}}{M_{судна}^{елем}}\right| 100\,\%. \quad (23)$$

Таким чином бачимо, що перевірки (18), (19) виконані.

ВИСНОВКИ

В статті було продемонстровано вирішення всіх поставлених задач для досягнення поставленої мети.

1. Були проаналізовані деталізовані статті навантаження або елементи і виявлено, що вони бувають двох типів: точкова маса та розподілений елемент. Точкова маса є зосередженою масою, яка вважається прикладеною в одній точці. Розподілений елемент має свій початок, кінець і масу.

2. В рамках задачі розробки методики вирішувалися дві під-задачі. Перша під-задача полягала в пошуку закону розподілу маси розподіленого елементу. Вибір був зроблений на користь лінійного закону типу $f(x) = kx + b$, тому що за наявної інформації для розподіленого елементу можливо сформувати лише систему з двох рівнянь, з яких у свою чергу знаходяться два коефіцієнти (k і b), необхідні для лінійного закону. Але окрім лінійного закону можна було б застосувати інші нелінійні закони, наприклад, логарифмічний $f(x) = a \cdot \ln x + b$ тощо. Це тема майбутніх досліджень, де необхідно досліджувати реальний розподіл тих чи інших елементів вздовж судна і підбирати під них закони, які б добре апроксимували цей розподіл і містили б лише два коефіцієнта. Припущення лінійного розподілу маси є універсальним, яке спрощує розрахунки. Проте прийнятий лінійний розподіл може відчутно спотворювати дійсний розподіл мас розподіленого елементу, такого, наприклад, як зовнішня обшивка, яка очевидно починається з нуля і закінчується нулем, будучи розподілена за деяким законом. В цьому випадку прийнятий лінійний розподіл мас є ніби осередненою характеристикою дійсного розподілу мас. Очевидно, що чим коротшими є розподілені елементи, тим точніші отримуватимуться ступінчасті розподіли мас за теоретичними шпаціями. Отже представлена концепція може незадовільно працювати для дуже протяжних розподілених елементів і значно спотворюватиме результати. Ще однією проблемою є отримання вироджених трапецій, про яку йшлася мова вище. Тут можна запропонувати різні підходи для вирішення вказаних проблем. Один з них – це розділити, якщо можливо, розподілений елемент на більш дрібні; інший – дослідити реальний розподіл мас для елементів подібних типів і апроксимувати його деякою нелінійною залежністю тощо. В рамках другої під-задачі був розроблений алгоритм отримання теоретичного ступінчатого розподілу мас судна вздовж його довжини, використовуючи масив деталізованих статей навантаження або елементів, де приймаються до уваги як точкові, так і розподілені елементи. Розроблена методика може використовуватися самостійно, для перевірки та контролю результатів, отриманих за іншими методами, або як доповнення до інших методик отримання ступінчатого розподілу мас по теоретичним шпаціям. Очевидно, що представлена методика може бути застосована як для регулярного, так і для нерегулярного розподілу шпацій, тому що початок і кінець шпацій задаються координатами, на які опирається розроблений алгоритм.

Розроблена методика дозволяє швидко отримувати ступінчатий розподіл мас задовільної точності без складних розрахунків із залученням детальних креслень або вартісних суднобудівних САПР. Це важливо на ранніх стадіях проєктування судна, коли розглядаються різні варіанти і компоновки елементів судна, де необхідно швидко розрахувати міцність, вібрацію тощо корпусу судна і супутні задачі. Для вже побудованих суден цей метод також буде давати задовільну точність, як про це відмічено і в тезах [5].

Був продемонстрований приклад розрахунку за розробленою методикою і її застосування для реального судна, де перевірки показали високу відповідність результатів. Розроблена методика була реалізована у вигляді підпрограми на C++, результати роботи якої і представлені в розділі 3.2 цієї статті.

Запропонована методика є водночас загальною і може бути розвинена на той випадок, коли закон розподілу статті навантаження є нелінійним.

Штучний інтелект в процесі роботи над статтею на всіх етапах не використовувався.

REFERENCES

[1] Bentley Advancing Infrastructure. (2026). Maxsurf (v. 2025.00.02) [Computer software]. https://maxsurf.net

[2] AVEVA Group Limited. (2026). AVEVA E3D Design (v. 3.1) [Computer software]. https://www.aveva.com/en/industries/manufacturing/ship-building/

[3] Cadmatic. (2026). Cadmatic Hull (v. 2026H1) [Computer software]. https://cadmatic.com/en/

[4] Straubinger, E. K., Curran, W. C., & Fighera, V. L. (1983). Fundamentals of naval surface ship weight estimating. Naval Engineers Journal, 95(3), 127–143.

[5] Hansch, David Laurence. (2008). Methods of determining the longitudinal weight distribution of a ship. In: Society of Allied Weight Engineers. 67th Annual conference of International Society of Allied Weight Engineers. Seattle: Society of Allied Weight Engineers. p. 2–19.

[6] ShipWeight – User's Guide, version 11.60, November 2015. 246 p.

[7] Chaeog Lim, Ik-seung Han, Byeong-cheol Park, Sang-jin Oh, Gi-yong Kim and Sung-chul Shin. (2022). Weight distribution algorithm for global ship analysis in preliminary design stage. Journal of Computational Design and Engineering. Vol. 9(3). pp. 907–918

[8] Munro-Smith, R. (1967). Applied Naval Architecture. American Elsevier Publishing Company, Inc. New York. 360 p.

[9] Hughes, Owen. (1988). Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach. Society of Naval Architects and Marine Engineers. Jersey City, New Jersey. 583 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Bentley Advancing Infrastructure. (2026). Maxsurf (v. 2025.00.02) [Computer software]. https://maxsurf.net

[2] AVEVA Group Limited. (2026). AVEVA E3D Design (v. 3.1) [Computer software]. https://www.aveva.com/en/industries/manufacturing/ship-building/

[3] Cadmatic. (2026). Cadmatic Hull (v. 2026H1) [Computer software]. https://cadmatic.com/en/

[4] Straubinger, E. K., Curran, W. C., & Fighera, V. L. (1983). Fundamentals of naval surface ship weight estimating. Naval Engineers Journal, 95(3), 127-143.

[5] Hansch, David Laurence. (2008). Methods of determining the longitudinal weight distribution of a ship. In: Society of Allied Weight Engineers. 67th Annual conference of International Society of Allied Weight Engineers. Seattle: Society of Allied Weight Engineers. p. 2–19.

[6] ShipWeight – User's Guide, version 11.60, November 2015. 246 p.

[7] Chaeog Lim, Ik-seung Han, Byeong-cheol Park, Sang-jin Oh, Gi-yong Kim and Sung-chul Shin. (2022). Weight distribution algorithm for global ship analysis in preliminary design stage. Journal of Computational Design and Engineering. Vol. 9(3). pp. 907–918

[8] Munro-Smith, R. (1967). Applied Naval Architecture. American Elsevier Publishing Company, Inc. New York. 360 p.

[9] Hughes, Owen. (1988). Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach. Society of Naval Architects and Marine Engineers. Jersey City, New Jersey. 583 p.

© Соков В. М.

Дата першого надходження статті до видання: 11.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)