

МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ОСАДКИ МОРСЬКОГО СУДНА ВНАСЛІДОК ЗМІНИ ГУСТИНИ ВОДИ

Андрєєв А. М., д.пед.н., професор, завідувач кафедри загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: andreevandrijn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5390-6813;

Стовба Т. А., к.е.н., доцент, доцент кафедри економіки та морського права Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: stovba.t1210@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2433-1122.

У статті розглянуто проблему визначення зміни осадки морського судна, обумовленої зміною густини води. Її практичне значення тісно пов'язане з розв'язанням завдань безпечного плавання. Одним із таких завдань є розрахунок посадки судна на етапі розроблення його вантажного плану. Іншим завданням є визначення маси вантажу на основі вимірювання осадки судна до та після вантажної операції. Порівняльний аналіз деяких методів визначення зміни осадки судна зі зміною густини води виявив межі їх практичного застосування. Вони визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Неврахування цих меж може призводити до виникнення грубих помилок у розрахунках посадки судна, а на практиці – до неправильного його завантаження. Розглянуті методи проілюстровані конкретними прикладами. У статті також показано можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки не лише прямостінних суден. Метод є також корисним у випадках: оцінювання верхньої межі зміни осадки судна, викликаной зміною густини води; визначення зміни осадки у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не суттєво. Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність методу граничної оцінки зміни осадки судна. Зокрема, показано, що можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти, за яких похибка методу граничної оцінки дорівнюватиме наперед заданому значенню (за конкретної різниці густини води). Визначений критерій дозволяє оцінювати умови, коли розбіжність у результатах за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей. Важливі напрями подальших досліджень пов'язані з підвищенням точності вимірювання осадки судна та густини води, адже похибки цих вимірювань значно обмежують точність визначення водотоннажності судна.

Ключові слова: плавучість; вантажна марка; осадка судна; густина води; вплив густини води на осадку судна; коефіцієнти повноти; метод граничної оцінки зміни осадки судна.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.046-058

Вступ. Однією з найважливіших морехідних характеристик судна, що пов'язана із безпекою плавання, є плавучість. Ця характеристика відображає здатність судна ходити із певною осадкою за заданої кількості вантажу [1]. Запас плавучості забезпечується висотою надводного борта, його мінімальне значення регламентується Міжнародною конвенцією про вантажну марку [2]. Отже, важливим завданням безпечного плавання є розрахунок посадки судна на етапі розроблення його вантажного плану. Для цього, зокрема, визначають осадки судна (носом та кормою) відповідно до його водотоннажності та густини води, в якій відбуватиметься перехід. На практиці прапляється також зворотна задача, що передбачає вимірювання осадки судна до та після навантаження/розвантаження для визначення маси вантажу (зокрема, навалочного). Тож осадка тісно корелює з економічною складовою експлуатації морського судна. Наприклад, зміна осадки судна «SUNRAY» навіть на 1 см (з 9,50 м до 9,51 м), відповідає понад 56 тонам вантажу або приблизно 36400–42000 дол. США (для сирової нафти) залежно від впливу різних факторів (маршруту, типу судна, геополітичних факторів, цін на бункер тощо).

Постановка проблеми. Тоді як об'єм зануреної частини судна визначається лише водотоннажністю та густиною води, його осадка залежить також від форми корпусу (його обводів) і цей вплив аналітично врахувати складно. Саме ця обставина ускладнює визначення зміни осадки судна ΔT залежно від зміни густини води при переході.

Аналіз відомих підходів визначення зміни осадки судна, що викликана зміною густини води, дав змогу виділити рекомендації щодо їх застосування в конкретних випадках.

Було також виявлено певні некоректності у застосуванні методів визначення зміни осадки судна зі зміною густини води. Адже кожен метод має свої межі застосування, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої (розрахункової) формули. Неврахування цих меж може призводити до виникнення грубих помилок у розрахунках посадки судна, а на практиці – до неправильного його завантаження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні основи гідростатики суден розглядалися Т. Фоссеном (Thor I. Fossen) у роботі [3]. Різні аспекти проблеми врахування впливу густини води на осадку морського судна розглядалися у науковій та навчальній літературі. Зокрема, проведений В. В. Івченком аналіз внеску різних чинників на густину забортної води виявив, що помітний внесок у зміну густини води, а, отже, й осадки судна, чинять зміна солоності та температура води [4].

Деякі методи визначення зміни осадки судна зі зміною густини води наведені у навчальних посібниках Х. Дж. Персі (H. J. Pursey) [5] та І. К. Кларка (I. C. Clark) [6]. Розглянуто, зокрема, особливості визначення зміни осадки за допомогою поправки FWA [6], а також більш загальний випадок – за допомогою параметра «число тон на 1 см осадки» (параметр TRC) [5]. Окремо розглянуто спосіб визначення зміни осадки у випадку прямостінних суден [5], однак не наводиться критерій, за яким можна було б оцінювати точність цього способу у випадку реальних суден.

Точність методів визначення зміни осадки судна на практиці обмежується точністю вимірювання самої осадки. Серед причин можливих похибок можуть бути такі [7]: погані погодні умови, хвилі на поверхні води; крен судна; явище паралакса при зчитуванні значень осадки; просідання судна внаслідок течії, особливо на міліні; велика різниця температури повітря і води, що призводить до різниці в тепловому розширенні зануреної та надводної частини корпусу судна; диферент судна; значення густини води можуть дещо відрізнятись з глибиною та в різних місцях навколо судна; можливий прогин/перегин судна. У цьому ж документі вказується на те, що наявну на судні табличну залежність водотоннажності від осадки також не можна вважати абсолютно точною (похибки методів обчислень).

Підвищення точності вимірювання осадки судна також було предметом наукових досліджень. Зокрема, у статті [8] досліджено вплив похибки у вимірюванні осадки судна на результати визначення водотоннажності за гідростатичними таблицями. Як альтернатива візуального вимірювання осадки запропоновано оптоволоконний датчик рівня рідини. Є відомим також спосіб контролю та вимірювання осадки за допомогою рідинних манометрів, шкали яких закріплюють на однаковій висоті з обох бортів судна [7]. У роботі [9] запропоновано протиколівальний пристрій, що дозволяє підвищити точність вимірювання осадки судна в умовах хвилювання на поверхні води. У дослідженнях [10, 11, 12] порівнюються методи візуального вимірювання осадки та методи її визначення розпізнаванням зображення, другий метод вважається більш перспективним. Точність вимірювання осадки судна цими методами обмежується формою меніска води на межі зі змоченою поверхнею борта (за повного штилю).

Мета та задачі дослідження. Метою статті є порівняльний аналіз відомих методів визначення зміни осадки судна, що обумовлена зміною густини води, а також з'ясування меж застосування цих методів.

Відповідно до мети були сформульовані такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати припущення, що мають місце під час отримання робочої формули в основних методах визначення зміни осадки судна, обумовленої зміною густини води.
2. З'ясувати межі практичного застосування цих методів.
3. Обґрунтувати можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки суден, запропонувати критерій застосування методу.
4. Проілюструвати розглянуті методи конкретними прикладами.

Виклад основного матеріалу. Нехай судно переходить із води густиною ρ_1 у воду густиною ρ_2 . Для визначеності приймемо, що $\rho_1 > \rho_2$ (рис. 1). Відповідно до закону Архімеда за такого переходу зменшення сили Архімеда (сили підтримки) завдяки

зменшенню густини води $(\rho_1 - \rho_2)V_1$ компенсується збільшенням цієї сили завдяки зростанню об'єму зануреної частини судна:

$$(\rho_1 - \rho_2)V_1 = \rho_2(V_2 - V_1). \quad (1)$$

Вводячи позначення $\Delta\rho \equiv \rho_2 - \rho_1$, $\Delta V \equiv V_2 - V_1$, маємо:

$$\Delta\rho \cdot V_1 = -\rho_2 \cdot \Delta V. \quad (2)$$

З формули (2) видно, що зменшення густини води ($\Delta\rho < 0$) призведе до збільшення осадки судна ($\Delta V > 0$) і навпаки. Формула (1) є вихідною для виведення робочих формул описаних нижче методів визначення зміни осадки судна. У статті осадкою вважатимемо середню осадку судна.

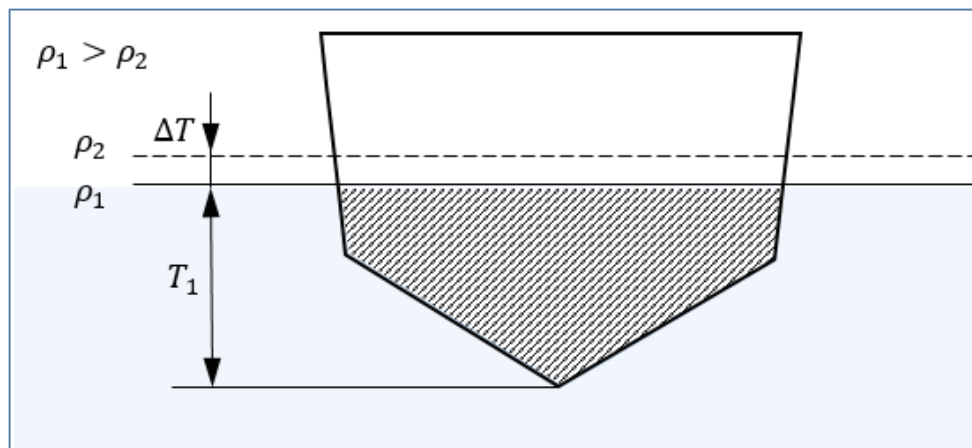


Рисунок 1 – Зміна осадки судна ΔT при переході з води густиною ρ_1 у воду густиною ρ_2 ($\rho_1 > \rho_2$): T_1 – осадка судна у воді густиною ρ_1

Метод визначення зміни осадки за водотоннажністю судна D та параметром ТРС.

Параметр ТРС (Tones per 1 cm) чисельно дорівнює масі вантажу, що спричиняє збільшення осадки судна на 1 см:

$$\text{TPC} \equiv q_{1\text{см}} = \frac{\delta D}{\delta T} \cdot \frac{1}{100}, \left(\frac{\text{т}}{\text{см}} \right). \quad (3)$$

Із зануренням судна на малу величину δT (1 см) площа S ватерлінії практично не змінюється, тому відповідна зміна об'єму занурення судна дорівнює:

$$\delta V = S\delta T,$$

а зміна водотоннажності

$$\delta D = \rho S\delta T. \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) отримуємо:

$$q_{1\text{см}} = \frac{\rho S}{100}. \quad (5)$$

Після заміни об'єму V_1 у рівнянні (1) формулою $V_1 = D/\rho_1$ та наступної підстановки формули (5) отримуємо робочу формулу методу:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot \frac{D}{100q_{1\text{см}}}. \quad (6)$$

Цей метод є найбільш загальним за сферою використання, оскільки дозволяє визначати зміну осадки, обумовленої зміною густини води, за довільної (але відомої) водотоннажності судна. Проте для його використання потрібно знати ще й ТРС (за густини води ρ_1), що відповідає цій водотоннажності. Відповідну інформацію можна знайти за вантажною шкалою судна або таблиці гідростатичних елементів.

Приклад 1. Судно з водотоннажністю $D = 40000$ т здійснює перехід з району, де густина води $\rho_1 = 1,015$ т/м³ до району з густиною води $\rho_2 = 1,005$ т/м³. Знайти зміну його

осадки, якщо число тон на 1 см осадки в воді густиною $\rho_0 = 1,025 \text{ т/м}^3$ дорівнює $q_{1\text{см}}(\rho_0) = 55,1 \text{ т/см}$.

Розв'язання. Приведемо значення $q_{1\text{см}}$ до густини води $\rho_1 = 1,015 \text{ т/м}^3$. Для цього скористаємось очевидним співвідношенням:

$$\frac{q_{1\text{см}}(\rho_1)}{q_{1\text{см}}(\rho_0)} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (7)$$

Справедливість виразу (7) є наслідком того, що в межах зміни осадки судна, викликаній зміною густини води, площа ватерлінії практично не змінюється.

$$q_{1\text{см}}(\rho_1) = \frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot q_{1\text{см}}(\rho_0) = 54,6 \text{ т/см}. \quad (8)$$

За формулою (6), врахувавши (8), визначаємо зміну осадки судна: $\Delta T \approx 7,3 \text{ см}$.

Метод визначення зміни осадки за відомою поправкою FWA. Поправка на прісну воду FWA (Fresh Water Allowance) визначається для кожного судна. Вона дорівнює зміні осадки судна (u мм) з водотоннажністю, що відповідає літній вантажній марці, при його переході з морської води в прісну та навпаки. Іншими словами, FWA чисельно дорівнює відстані (u мм) між літньою вантажною маркою та вантажною маркою в прісній воді.

Формулу для розрахунку FWA можна отримати з (6). Якщо судно переходить із морської води ($\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$) у прісну ($\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$), формула для зміни осадки (6) набуває вигляду:

$$\Delta T = \frac{1}{40} \cdot \frac{D}{100q_{1\text{см}}}. \quad (9)$$

Якщо у формулу (9) підставити значення водотоннажності D , що спричиняє осадку судна по літню вантажну марку, а також відповідне цій осадці значення $q_{1\text{см}}$ (TPC), отримаємо формулу для поправки на прісну воду. Виражена в мм ця поправка дорівнюватиме:

$$FWA = \Delta T(\text{мм}) = \frac{D}{4q_{1\text{см}}}. \quad (10)$$

Отже, визначення зміни осадки судна ΔT за відомою поправкою FWA буде коректним, якщо, по-перше, судно завантажене повністю (повністю використана його вантажопідйомність), та, по-друге, судно переходить із морської води ($\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$) у прісну ($\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$) або навпаки. В іншому випадку (наприклад, за неповного завантаження) метод буде давати похибку.

Приклад 2. Судно має осадку $T_1 = 7,18 \text{ м}$ у морській воді густиною $1,025 \text{ т/м}^3$. Якою буде осадка судна в воді густиною $1,009 \text{ т/м}^3$? Поправка FWA для судна дорівнює 122 мм.

Розв'язання. Поправка FWA справедлива для випадку, якщо густина води змінюється від значення $1,025 \text{ т/м}^3$ до значення $1,000 \text{ т/м}^3$ та навпаки. У задачі ця зміна відбувається в межах від $1,025 \text{ т/м}^3$ до $1,009 \text{ т/м}^3$, тож маємо це врахувати. Відповідна скоригована поправка називається поправкою на «портову» воду – DWA (Dock Water Allowance) [5]. Цю поправку знаходять за поправкою FWA пропорцією:

$$DWA = FWA \frac{\rho_{\text{sw}} - \rho_{\text{dw}}}{\rho_{\text{sw}} - \rho_{\text{fw}}}, \quad (11)$$

де ρ_{sw} – густина морської води, $\rho_{\text{sw}} = 1,025 \text{ т/м}^3$;

ρ_{fw} – густина прісної води, $\rho_{\text{fw}} = 1,000 \text{ т/м}^3$;

ρ_{dw} – густина води, на яку робиться корекція FWA (густина «портової» води), $\rho_{\text{dw}} = 1,009 \text{ т/м}^3$.

Отже, згідно з формулою (11) маємо $DWA = 78 \text{ мм}$, тож нова осадка $T_2 = 7,26 \text{ м}$.

Метод визначення зміни осадки за відомою залежністю осадки T судна від його водотоннажності D за певного значення густини. Таку залежність можна знайти за вантажною шкалою судна, за таблицею гідростатичних елементів, за кривою вантажного розміру. На практиці часто трапляються випадки, коли залежність осадки судна від його водотоннажності $T = T(D)$ відома для певного значення густини (наприклад, для морської води густиною $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$), а треба знайти осадку у воді іншої густини. Наприклад, на

балкерах вантажна шкала може містити залежність осадки від водотоннажності лише для морської води [13], тож при роботі із такими шкалами виникає завдання визначення осадки або її зміни для фактичної густини води. Розглянемо конкретний приклад.

Судно має осадку T_1 у прісній воді ($\rho_1 = 1,000 \text{ т/м}^3$). Потрібно знайти осадку T_2 в морській воді ($\rho_2 = 1,025 \text{ т/м}^3$), якщо відома залежність $T = T(D)$ за відповідної густини. Для визначення T_2 необхідно спочатку знайти водотоннажність судна D . Скористаємось прийомом, що покладено в основу методу, що розглядається. Оскільки за умовою задачі відома залежність $T = T(D)$ для морської води, подумки довантажимо судно до водотоннажності D^* так, щоб його осадка в морській воді залишилась такою самою як у прісній. З рівності об'ємів зануреної частини судна в прісній та морській воді отримуємо вираз:

$$\frac{D}{D^*} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (12)$$

З виразу (12) знаходимо вихідну водотоннажність судна:

$$D = D^* \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (13)$$

Отже, за відомою залежністю $T = T(D)$ для морської води знаходимо значення водотоннажності D^* судна, що має в морській воді таку ж саму осадку T_1 , що й у прісній. І за формулою (13) визначаємо вихідну водотоннажність D судна. За цим значенням водотоннажності визначаємо осадку судна T_2 в морській воді, а потім і її зміну ΔT .

Суть методу, що розглядається, можна наочно пояснити за допомогою графіків залежності $T = T(D)$ (рис. 2). Якщо під час визначення ΔT одна із залежностей є відомою (наприклад, залежність за густини ρ_2), іншу (за густини ρ_1) можна визначити за допомогою формули (13). У нашому прикладі була відома осадка T_1 у прісній воді. Цій осадці відповідає т. A на графіку за густини ρ_1 та т. B на графіку за густини ρ_2 . Абсциси цих точок D та D^* відповідно пов'язані співвідношенням (13). Тож визначивши спочатку D^* , можна знайти й D (вихідну водотоннажність судна) і за нею вже знайти осадку T_2 в морській воді (т. C на рис. 2).

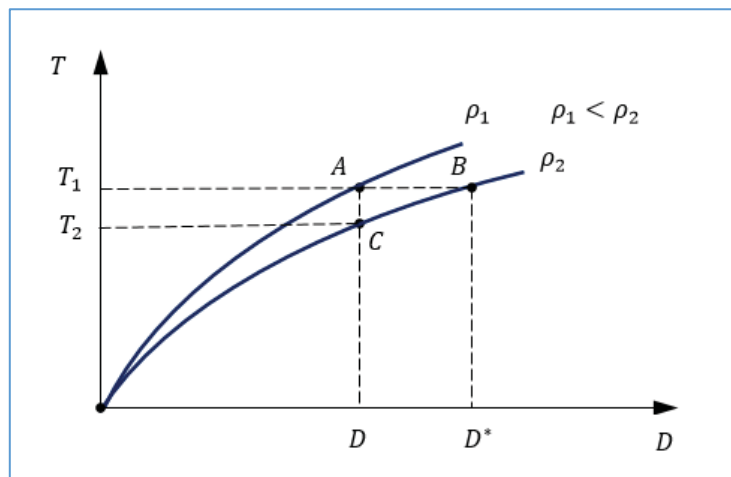


Рисунок 2 – Графіки залежності осадки судна від водотоннажності (вантажний розмір) за різної густини води ($\rho_1 < \rho_2$)

Зауваження. У навчально-методичній літературі зустрічається неправильне тлумачення формули (13), що начебто вона виражає той факт, що при переході судна з води густиною ρ_1 у воду густиною ρ_2 , його водотоннажність змінюється відповідно з D до D^* . Таке твердження є принципово не правильним. Водотоннажність судна дорівнює його масі, вона аж ніяк не може змінюватися зі зміною густини води. Змінюється об'єм зануреної частини судна (його осадка). Формула ж (13) описує випадок, коли судно має однакову осадку у воді різної густини, зрозуміло, що це може бути лише за різних значень водотоннажності.

До переваг описаного методу визначення ΔT можна віднести його відносну точність, адже значення осадок відповідають фактичній водотоннажності судна. Проте для використання методу має бути відомий великий масив даних, зокрема, залежність $T = T(D)$, подана, наприклад, у табличній (вантажна шкала) або графічній (вантажний розмір) формі. Слід також зважати на те, що самі ці залежності можуть містити похибки [7].

Метод визначення ΔT за осадкою T судна та коефіцієнтами повноти. Цими коефіцієнтами у теорії судна вважають безрозмірні числові показники, що характеризують форму підводної частини корпусу, дають інформацію про повноту його обводів [14, 15]. Розрізняють п'ять таких коефіцієнтів (три з яких є незалежними). Для цілей нашого дослідження розглянемо такі:

– коефіцієнт загальної повноти δ – відношення об'єму V зануреної частини судна до об'єму паралелепіпеда, що має довжину L та ширину B , що відповідають сторонам прямокутника, в який вписано чинну ватерлінію, а також висоту T , що дорівнює осадці судна:

$$\delta = \frac{V}{LBT}; \quad (14)$$

– коефіцієнт повноти площі ватерлінії α – відношення площі S чинної ватерлінії до площі прямокутника, в який вписано чинну ватерлінію:

$$\alpha = \frac{S}{LB}; \quad (15)$$

– коефіцієнт вертикальної повноти χ – відношення об'єму V зануреної частини судна до об'єму вертикального циліндра з площею основи S , що дорівнює площі ватерлінії, та висотою T , що дорівнює осадці судна:

$$\chi = \frac{V}{ST} = \frac{\delta}{\alpha}. \quad (16)$$

Для отримання робочої формули цього методу, виразимо об'єм V_1 та зміну об'єму ΔV для формули (1) через параметри судна: коефіцієнт загальної повноти δ , довжину L , ширину B , осадку T та площу чинної ватерлінії S :

$$V_1 = \delta LBT, \quad (17)$$

$$\Delta V = S\Delta T. \quad (18)$$

Припускаємо, що в межах зміни осадки ΔT судна його довжина, ширина, площа ватерлінії та коефіцієнт загальної повноти практично не змінюються.

Підставивши формули (17) та (18) у вираз (1) та врахувавши формули (15) та (16), отримаємо робочі формули для визначення зміни осадки:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1 \cdot \frac{\delta}{\alpha}, \quad (19)$$

або

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1 \cdot \chi. \quad (20)$$

Метод дозволяє знайти точні значення ΔT за умови, що коефіцієнти повноти δ , α , χ відповідають фактичній його осадці T . Якщо ця умова не виконується (наприклад, коефіцієнти повноти взяті для випадку осадки судна з неповним завантаженням), метод дає наближений результат, хоча й прийнятний з практичного погляду (див. метод граничної оцінки).

Приклад 3. Судно переходить з Атлантичного океану в Середземне море. Як зміниться осадка судна? Водотоннажність судна $D = 12000$ т, його розміри $L \cdot B \cdot T = 120\text{м} \cdot 17\text{м} \cdot 7,2\text{м}$ за чинної ватерлінії площею $S = 1750$ м². Вважати густину води Атлантичного океану рівною $\rho_1 = 1,025$ т/м³, а Середземного моря – $\rho_2 = 1,029$ т/м³.

Розв'язання. Розміри судна в умові задачі відповідають чинній ватерлінії. Об'єм зануреної частини судна в Атлантичному океані: $V = D/\rho_1 = 11707$ м³.

За формулами (14), (15), (16) визначаємо коефіцієнти повноти:

- коефіцієнт загальної повноти $\delta = 0,8$;
- коефіцієнт повноти площі ватерлінії $\alpha = 0,86$;
- коефіцієнт вертикальної повноти $\chi = 0,93$.

Зміну осадки судна знаходимо за формулою (19) або (20): $\Delta T \approx -2,6$ см. Отже, осадка зменшиться на 2,6 см.

Метод граничної оцінки зміни осадки судна (припущення прямоствінності судна).

Якщо судно прямоствінне (судно із коробчастими обводами), об'єм V_1 у рівнянні (1) можна представити добутком осадки T_1 та площі ватерлінії S , яка тепер не залежить від осадки. Врахувавши це, а також формулу зміни об'єму $\Delta V = S\Delta T$, отримуємо з (1) робочі формули методу граничної оцінки:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1, \quad (21)$$

або

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (22)$$

Цей метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки для випадку прямоствінних суден. Проте значення методу граничної оцінки цим не обмежується. Простота методу робить його цінним у випадках:

- оцінювання *верхньої межі* зміни осадки судна ΔT , викликаній зміною густини води, адже не поодинокі випадки, коли потрібно встановити, чи не перевищить осадка судна критичну межу (це й пояснює назву методу, що розглядається). Ця оцінка буде справедливою для суден, у яких площа чинної ватерлінії зростає із збільшенням осадки (тобто для переважної більшості суден);

- наближеного визначення ΔT у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно.

Приклад 4. Судно переходить з Атлантичного океану в Середземне море. Оцінити зміну осадки судна. Осадка судна в Атлантичному океані дорівнювала $T_1 = 7,2$ м. Вважати густину води Атлантичного океану рівною $\rho_1 = 1,025$ т/м³, а Середземного моря – $\rho_2 = 1,029$ т/м³.

Розв'язання. Метод граничної оцінки (формула (21)) дозволяє досить просто знайти наближене значення $|\Delta T| = 2,8$ см, не потребуючи для цього додаткової інформації про судно. Відхилення від «точного» значення $|\Delta T| = 2,6$ см, знайденого у прикладі 3, складає 2 мм (8%). Цей приклад є показовим – іноді точність може бути надмірною, невиправданою з практичного погляду. Тож у подібних випадках корисно спочатку оцінити «зверху» можливе значення ΔT за допомогою методу граничної оцінки. Перевагою цього методу є його простота, оскільки не потребує додаткової довідкової інформації про судно.

Порівняння формул (20) та (21) для точного та наближеного визначення ΔT дозволяє з'ясувати критерій точності застосування методу граничної оцінки. Для цього розглянемо вирази для абсолютної Δ та відносної ε похибок (розбіжностей) наближеного обчислення зміни осадки методом граничної оцінки:

$$\Delta = \Delta T_{\text{набл}} - \Delta T_{\text{точн}} = \Delta T_{\text{набл}}(1 - \chi); \quad (23)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\Delta T_{\text{точн}}} = \frac{1}{\chi} - 1. \quad (24)$$

Формула (24) дозволяє знайти критичне значення коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{крит}}$, вище якого відносна похибка визначення ΔT не перевищуватиме наперед заданого значення ε_0 :

$$\chi_{\text{кр}} = \frac{1}{\varepsilon_0 + 1}. \quad (25)$$

Наприклад, з похибкою не більше 10% будуть результати визначення ΔT за методом граничної оцінки для суден з коефіцієнтами вертикальної повноти не менше $\chi_0 = 0,91$.

Як ілюстрацію можливого використання методу граничної оцінки для визначення зміни осадки судна для випадків із різними значеннями зміни густини води наведено розрахунки для судна «SUNRAY» (табл.). У випадку невеликої різниці між значеннями густини води (у таблиці цій умові відповідають $\Delta\rho = 0,005 \text{ т/м}^3$ та $\Delta\rho = 0,010 \text{ т/м}^3$) метод граничної оцінки виявляє точність до 1 см для всього діапазону можливих значень осадки судна (від 4,5 м до 12,8 м). За порівняно великої різниці густини ($\Delta\rho = 0,029 \text{ т/м}^3$) абсолютна розбіжність у значеннях ΔT , отриманих точним та наближеним методами, вже перевищує 1 см, хоча й для цього випадку існує деякий інтервал осадок (приблизно до 6 м) з малою розбіжністю результатів.

Таблиця 1 – Порівняння результатів визначення зміни осадки судна двома методами: точним (за параметром ТРС) та наближеним (метод граничної оцінки) для деяких значень зміни густини води

Вихідні дані			Зміна осадки за зміни густини води											
$\rho_1=1,029 \text{ т/м}^3$			$\rho_2=1,024 \text{ т/м}^3$				$\rho_2=1,019 \text{ т/м}^3$				$\rho_2=1,000 \text{ т/м}^3$			
Осадка T , м	Водогоннажність D , т	Коеф. верт. повн. χ	За ТРС $\Delta T_{\text{точн}}$, см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл}}$, см	Розбіжн.		За ТРС $\Delta T_{\text{точн}}$, см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл}}$, см	Розбіжн.		За ТРС $\Delta T_{\text{точн}}$, см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл}}$, см	Розбіжн.	
					абсол. Δ , см	відн. ε , %			абсол. Δ , см	відн. ε , %			абсол. Δ , см	відн. ε , %
4,50	21460,0	0,924	2,0	2,2	0,2	8	4,1	4,4	0,3	8	12,1	13,1	1,0	8
5,00	24051,1	0,923	2,3	2,4	0,2	8	4,5	4,9	0,4	8	13,4	14,5	1,1	8
5,50	26671,7	0,920	2,5	2,7	0,2	9	5,0	5,4	0,4	9	14,7	16,0	1,3	9
6,00	29318,7	0,919	2,7	2,9	0,2	9	5,4	5,9	0,5	9	16,0	17,4	1,4	9
6,50	31988,3	0,917	2,9	3,2	0,3	9	5,9	6,4	0,5	9	17,3	18,8	1,6	9
7,00	34682,6	0,915	3,1	3,4	0,3	9	6,3	6,9	0,6	9	18,6	20,3	1,7	9
7,50	37401,2	0,913	3,3	3,7	0,3	9	6,7	7,4	0,6	9	19,9	21,7	1,9	9
8,00	40142,9	0,911	3,6	3,9	0,3	10	7,2	7,9	0,7	10	21,1	23,2	2,1	10
8,50	42914,9	0,910	3,8	4,2	0,4	10	7,6	8,3	0,8	10	22,4	24,6	2,2	10
9,00	45711,3	0,907	4,0	4,4	0,4	10	8,0	8,8	0,8	10	23,7	26,1	2,4	10
9,50	48533,5	0,903	4,2	4,6	0,4	11	8,4	9,3	0,9	11	24,9	27,5	2,7	11
10,00	51382,9	0,900	4,4	4,9	0,5	11	8,8	9,8	1,0	11	26,1	29,0	2,9	11
10,50	54259,0	0,897	4,6	5,1	0,5	11	9,2	10,3	1,1	11	27,3	30,4	3,1	11
11,00	57154,1	0,897	4,8	5,4	0,6	12	9,7	10,8	1,1	12	28,6	31,9	3,3	12
11,50	60063,1	0,897	5,0	5,6	0,6	11	10,1	11,3	1,2	11	29,9	33,3	3,4	11
12,00	62984,3	0,898	5,3	5,9	0,6	11	10,6	11,8	1,2	11	31,2	34,8	3,6	11
12,50	65916,6	0,899	5,5	6,1	0,6	11	11,0	12,3	1,2	11	32,6	36,2	3,7	11
12,80	67681,1	0,899	5,6	6,2	0,6	11	11,3	12,6	1,3	11	33,4	37,1	3,7	11

На практиці точність визначення ΔT обмежується багатьма факторами: похибка вимірювання осадки судна (допустимою межею відповідної похибки часто вважають 1 см [7]); похибка під час використання вантажної шкали (допустимою межею похибки вважають 1 см [1]); похибки вимірювання фактичної густини води (інструментальні та випадкові); похибки внаслідок припущень, зроблених під час отримання робочої формули методу

(наприклад, у методі визначення ΔT за параметром ТРС площа ватерлінії приймається незмінною для всього діапазону зміни осадки внаслідок зміни густини води) та інші. Тож у деяких випадках розбіжність у результатах визначення ΔT за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей.

Інколи практичний інтерес має також зворотна задача: знайти для певного діапазону осадок судна критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{крит}}$, за яких похибка методу граничної оцінки дорівнює наперед заданому значенню Δ (за конкретної різниці густини води). Якщо значення $\chi_{\text{крит}}$ відомі, то порівняння їх із фактичними значеннями коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{факт}}$ для судна дає змогу робити висновок про можливість використання методу граничної оцінки із заданою точністю. Самі ж значення $\chi_{\text{крит}}$ можна знайти з виразу (23), врахувавши також формулу (21):

$$\chi_{\text{крит}} = 1 - \frac{\rho_2 \cdot \Delta}{(\rho_1 - \rho_2) \cdot T_1} \quad (26)$$

Проілюструємо цю можливість на прикладі вже згаданого судна «SUNRAY». Для цього судна були розраховані фактичні значення коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{факт}}$ для деяких значень осадки (див. табл.). Для тих самих значень осадки за формулою (26) знайдені критичні значення $\chi_{\text{крит}}$ цього ж коефіцієнта для наперед заданої точності Δ на рівні 1 см. Отримані залежності $\chi_{\text{факт}} = \chi_{\text{факт}}(T)$ та $\chi_{\text{крит}} = \chi_{\text{крит}}(T)$ (для трьох випадків різниці густини води ($\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$)) подані графічно на рис. 3.

З графіків, наведених на рис. 3, видно, що для зазначеного судна у випадку значної різниці густини води ($\Delta\rho = 0,029 \text{ т/м}^3$) фактичні значення $\chi_{\text{факт}}$ лежать нижче критичних $\chi_{\text{крит}}$ практично для всіх значень осадки. За такої різниці $\Delta\rho$ метод граничної оцінки буде давати наближені значення ΔT із розбіжністю з точним методом більшою за 1 см. За різниці густини води $\Delta\rho = 0,010 \text{ т/м}^3$ розбіжність у точних та наближених значеннях ΔT перевищує задане значення 1 см лише для осадок, більших за 10 м. У випадку ж малої різниці густини води ($\Delta\rho = 0,005 \text{ т/м}^3$) можна використовувати метод граничної оцінки з похибкою, що не перевищує 1 см на всьому діапазоні можливих значень осадки (для всього діапазону значень осадки графік $\chi_{\text{крит}} = \chi_{\text{крит}}(T)$ лежить під графіком $\chi_{\text{факт}} = \chi_{\text{факт}}(T)$).

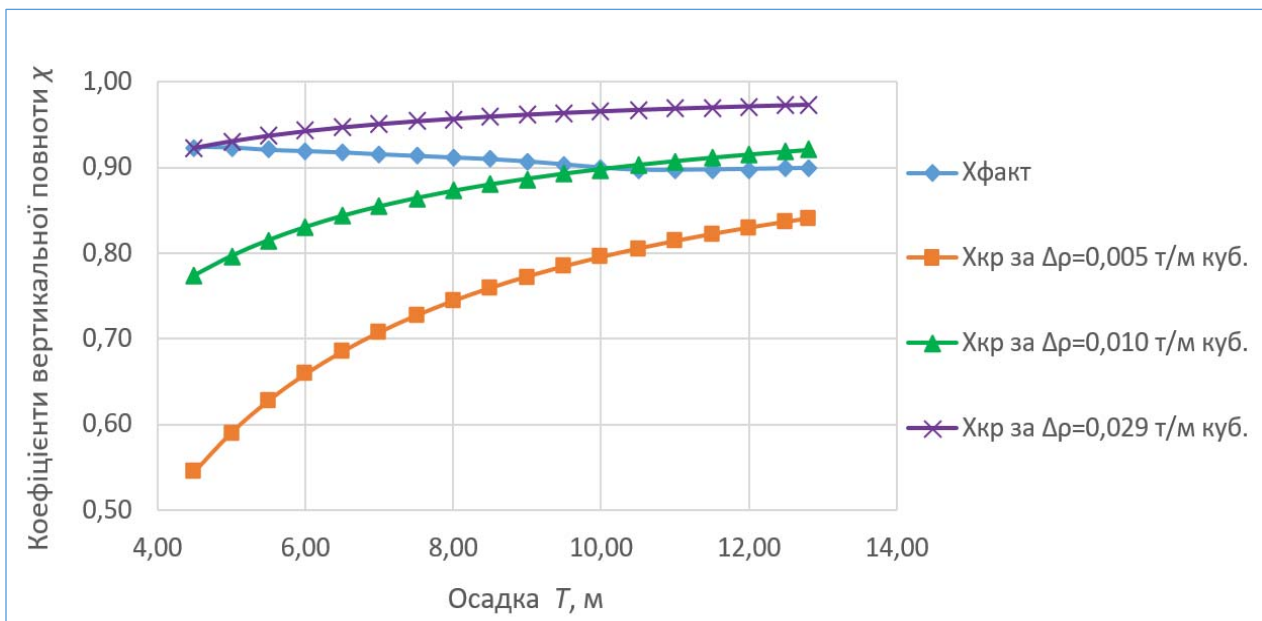


Рисунок 3 – Порівняння критичних значень коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{кр}}$ із фактичними $\chi_{\text{факт}}$ за деяких значень різниці густини води $\Delta\rho$ при переході судна

Основні результати та їх обговорення. У статті проаналізовано методи визначення зміни осадки судна, обумовленої зміною густини води, виділено межі застосування цих методів, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Аналізом охоплено методи:

– за водотоннажністю судна D та параметром ТРС. Метод є найбільш загальним за сферою використання, оскільки дозволяє визначати зміну осадки, обумовленої зміною густини води, за довільної (але відомої) водотоннажності судна. Для його використання потрібно знати параметр ТРС (за певного значення густини води), що відповідає цій водотоннажності;

– за відомою поправкою FWA. Визначення зміни осадки судна за цим методом буде коректним, якщо, по-перше, судно завантажене повністю (повністю використана його вантажопідйомність), та, по-друге, судно переходить із морської води ($\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$) у прісну ($\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$) або навпаки. В іншому випадку (наприклад, за неповного завантаження) метод буде давати похибку;

– за відомою залежністю осадки T судна від його водотоннажності D за певного значення густини. Перевагою методу є його відносна точність, адже значення осадок відповідають фактичній водотоннажності судна, однак для використання методу має бути відомий великий масив даних, зокрема, залежність $T = T(D)$, що подана, наприклад, у табличній (вантажна шкала) або графічній (вантажний розмір) формі;

– за осадкою T судна та коефіцієнтами повноти корпусу судна. Метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки за умови, що коефіцієнти повноти δ , α , χ відповідають фактичній його осадці. Якщо ця умова не виконується (наприклад, коефіцієнти повноти взяті для випадку осадки судна з повним вантажем), метод дає наближений результат;

– за граничною оцінкою зміни осадки судна (припущення прямоствінності судна). Метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки для випадку прямоствінних суден. Проте теоретичний аналіз цього методу виявив можливість розширення його практичного значення: для оцінювання верхньої межі зміни осадки судна ΔT , викликані зміною густини води (оцінка буде справедливою для суден, у яких площа чинної ватерлінії зростає зі збільшенням осадки, тобто для переважної більшості суден); для наближеного визначення ΔT у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно. Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність цього методу. Зокрема, на прикладі конкретного судна показано, що в методі граничної оцінки можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{крит}}$, за яких похибка цього методу дорівнює наперед заданому значенню Δ (за конкретної різниці густини води).

Висновки. Порівняльний аналіз деяких методів визначення зміни осадки судна, що обумовлена зміною густини води, дозволив виявити межі їх практичного застосування, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Показано можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки не лише прямоствінних суден. Метод є також корисним у випадках: оцінювання верхньої межі зміни осадки судна, викликані зміною густини води; визначення зміни осадки у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно.

Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність методу граничної оцінки зміни осадки судна. Зокрема, показано, що можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти $\chi_{\text{крит}}$, за яких похибка методу граничної оцінки дорівнюватиме наперед заданому значенню Δ (за конкретної різниці густини води).

У зв'язку з тим, що на практиці точність визначення зміни осадки обмежується багатьма факторами (зокрема, інструментальні та випадкові похибки вимірювання осадки судна, фактичної густини води; похибки внаслідок припущень, зроблених під час отримання

робочої формули методу та інші), мають місце випадки, коли розбіжність у результатах визначення ΔT за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей.

Перспективи подальших досліджень. Важливі напрями подальших досліджень пов'язані з підвищенням точності вимірювання осадки судна та густини води, адже похибки цих вимірювань значно обмежують точність визначення водотоннажності судна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шибасєв О. Г., Вишневська О. Д., Вишневський Д. О. Техніка і технології морського транспорту: навч. посібн. Одеса: ОНМУ, 2022. 128 с. URL: <https://surl.li/ieuwsp>.
2. Міжнародна конвенція про вантажну марку (1966 р.). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text.
3. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control / Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Hoboken, NJ: Wiley, 2021, P. 731.
4. Івченко В. В. Фізика для моряків у прикладах і задачах. Механіка: навч. посібн.: у 2 ч. Ч. 1. Херсон: ХДМА, 2021. 64 с.
5. Pursey H. J. Merchant Ship Stability (Metric Edition). A Companion to "Merchant Ship Construction". Glasgow Brown: Son & Ferguson, LTD, Nautical publishers. 1996. P. 212.
6. Clark I. C., BSc, MSc. The Management of Merchant Ship Stability, Trim & Strength. London: The Nautical Institute, 2011. P. 292.
7. Draught survey. Carefully to Carry Consolidated Edition 2023. Chapter 16. URL: <https://surl.li/uyyuqf>.
8. Ivče R., Jurdana I., Mohović R. Determining weight of cargo onboard ship by means of optical fibre technology draft reading. *Promet-Traffic and Transportation*. 2011. Vol. 23 (6). pp. 421–429. <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.177>.
9. Wei Y., Du H., Hu Q., Wang H. Optimizing Ship Draft Observation with Wave Energy Attenuation and PaddlePaddle-OCR in an Anti-Fluctuation Device. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. 12(10). 1865. <https://doi.org/10.3390/jmse12101865>.
10. Wei Y. Research Review of Ship Draft Observation Methods. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023. 8(2). pp. 33–42. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20230802.11>.
11. Wang Z. A Ship Draft Line Detection Method Based on Image Processing and Deep Learning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Ser. 1575 012230. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1575/1/012230>.
12. Tsujii T., Yoshida H., Liguni Y. Automatic draft reading based on image processing. *Optical Engineering*. 2016. 55(10). 104104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.10.104104>.
13. Давидов І. П., Кучер Ю. П., Сіряченко В. Ф., Бурмака О. І. Теорія і будова судна: конспект лекцій. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 96 с.
14. Прадюх В. І., Капліна А. А. Морехідні якості суден: навч. посібн. Херсон: ХДМА, 2021. 108 с.
15. Колеченцева Т. Фізичні задачі практичного спрямування як засіб підвищення ефективності навчання здобувачів вищої освіти морської галузі. *Актуальні питання гуманітарних наук: міжвузівський збірник наукових праць молодих вчених Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка* / [редактори-упорядники М. Пантюк, А. Душний, І. Зимомря]. Дрогобич: Видавничий дім «Гельветика», 2020. Вип. 31. Том 3. С. 231–237.

REFERENCES

1. Shybaiev, O. H., Vyshnevskaya, O. D., Vyshnevskiy, D. O. (2022). *Tekhnika i tekhnolohii morskoho transportu: navch. posibn.* Odesa: ONMU. URL: <https://surl.li/ieuwcp>.
2. Mizhnarodna konventsia pro vantazhnu marku. (1966). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text.
3. Fossen, T. I. (2021). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control.* Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Hoboken, NJ: Wiley.
4. Ivchenko, V. V. (2021). *Fizyka dla moriakiv u prykladakh i zadachakh. Mekhanika: navch. posibn.: u 2 ch. Ch. 1.* Kherson: KhDMA.
5. Pursey, H. J. (1996). *Merchant Ship Stability (Metric Edition). A Companion to "Merchant Ship Construction".* Glasgow Brown: Son & Ferguson, LTD, Nautical publishers.
6. Clark, I. C., BSc, MSc. (2011). *The Management of Merchant Ship Stability, Trim & Strength.* London: The Nautical Institute.
7. Draught survey. Carefully to Carry Consolidated Edition 2023. Chapter 16. URL: <https://is.gd/5vbOuv>.
8. Ivče, R., Jurdana, I., Mohović, R. (2011). Determining weight of cargo onboard ship by means of optical fibre technology draft reading. *Promet-Traffic and Transportation.* Vol. 23 (6). 421–429. <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.177>.
9. Wei, Y., Du, H., Hu, Q., Wang, H. (2024). Optimizing Ship Draft Observation with Wave Energy Attenuation and PaddlePaddle-OCR in an Anti-Fluctuation Device. *Journal of Marine Science and Engineering.* 12(10). 1865. <https://doi.org/10.3390/jmse12101865>.
10. Wei, Y. (2023). Research Review of Ship Draft Observation Methods. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering.* 8(2). 33-42. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20230802.11>.
11. Wang, Z. (2020). A Ship Draft Line Detection Method Based on Image Processing and Deep Learning. *Journal of Physics: Conference Series.* Ser. 1575 012230. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1575/1/012230>.
12. Tsujii, T., Yoshida, H., Liguni, Y. (2016). Automatic draft reading based on image processing. *Optical Engineering.* 55(10). 104104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.10.104104>.
13. Davydov, I. P., Kucher, Yu. P., Siriachenko, V. F., Burmaka, O. I. (2019). *Teoriia i budova sudna: konspekt lektsii.* Odesa: NU «OMA».
14. Pradiukh, V. I., Kaplina, A. A. (2021). *Morekhidni yakosti suden: navch. posibn.* Kherson: KhDMA.
15. Kolechentseva, T. (2020). Fizychni zadachi praktychnoho spriamuvannia yak zasib pidvyshchennia efektyvnosti navchannia здобувачив vyshchoi osvity morskoi haluzi. Aktualni pytannia humanitarnykh nauk: mizhvuzivskiy zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh Drohobyt'skoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Ivana Franka / [redaktery-uporiadnyky M. Pantiuk, A. Dushnyi, I. Zymomria]. Drohobych: Vydavnychiy dim «Helvetyka». Vyp. 31. Tom 3. 231–237.

Andreev A. M., Stovba T. A. LIMITS OF THE APPLICATION OF METHODS FOR DETERMINING THE CHANGE IN THE DRAFT OF A SEA VESSEL DUE TO A CHANGE IN THE DENSITY OF WATER

Abstract The article considers the problem of determining the change in the draft of a seagoing vessel due to a change in water density. Its practical significance is closely related to solving the problems of safe navigation. One such problem is the calculation of a vessel's draft at the stage of developing its cargo plan. Another is determining the cargo mass based on measuring the vessel's draft before and after cargo operations. A comparative analysis of several methods for determining the change in a ship's draft due to a change in water density has revealed the limits of their practical application. These limits are defined by the assumptions made when deriving the working formula. Failure to consider these limits can lead to gross errors in draft calculations and, in practice, to incorrect vessel loading. The methods under consideration are illustrated with specific examples.

The article also demonstrates the potential for expanding the practical significance of the marginal estimation method for determining draft changes not only in straight-walled vessels. The method is also useful in cases such as: estimating the upper limit of draft change caused by a change in water density; determining draft changes in cases where water density does not vary significantly during the ship's passage.

A criterion is proposed that allows for evaluating the accuracy of the marginal estimation method for determining draft changes. In particular, it is shown that it is possible to identify critical values of the vertical fineness coefficient for a certain draft range at which the error of the marginal estimation method equals a specified value (for a given difference in water density). This criterion allows us to assess the conditions under which the discrepancy between the results of "exact" methods and the marginal estimation method may be acceptable for practical purposes.

Important areas of further research are related to improving the accuracy of measuring the ship's draft and the water density, as the errors in these measurements significantly limit the accuracy of determining the vessel's displacement.

Key words: buoyancy; load-lines; ship's draft; water density; the effect of water density on the draft of a ship; fineness coefficients; method of marginal estimation of the vessel's draft change.

© Андреев А. М., Стомба Т. А.

Статтю прийнято до редакції 12.05.2025