

УДК 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-7-17

**МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОЗДОВЖНИХ ПРИСКОРЕНЬ,  
ЩО ВИНИКАЮТЬ НА БОРТУ СУДНА ПІД ЧАС ЗУСТРІЧІ З ХВИЛЕЮ**

**О.О. Каніфольський**

к.т.н., доцент кафедри «Суднобудування і судноремонт

ім. професора Ю.Л. Воробйова»

ORCID:0000-0001-7288-4835

e-mail:oleksandrkanifolskyi@gmail.com

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

***Анотація.** В статті запропоновано вирішення задачі про розрахунок значень поздовжніх прискорень, що діють на судно при його зустрічі з хвилею. В деяких документах ІМО наводяться дані, які отримані дослідницьким шляхом та пропонуються для розрахунку міцності засобів для кріплення вантажу на судні. Створена теоретична база для розрахунків, що пов'язані зі значеннями поздовжніх прискорень. Запропоновано такі прискорення розраховувати за допомогою нової формули, для розрахунку поздовжньої сили. Ця формула отримана після аналізу виразу для Energy Wave Criterion (EWC), який базується на співвідношеннях повної енергії хвилі та кінетичної енергії судна, та має подібність до критерію Ньютона. Повна енергія хвилі розраховується шляхом представлення профілю хвилі в вигляді трохоїди. Розраховано значення поздовжніх прискорень та проведено порівняння цих значень з результатами, які були отримані дослідницьким шляхом. Для порівняння значень сили впливу хвилі на об'єкт, було проведено порівняльний аналіз за допомогою метода Сенфлу, що використовується для оцінки дії хвиль на гідротехнічні споруди.*

***Ключові слова:** поздовжні прискорення, Energy Wave Criterion, сила хвильового впливу.*

UDC 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-7-17

**METHOD OF CALCULATING  
THE LONGITUDINAL ACCELERATIONS OCCURRING  
ON BOARD OF THE SHIP DURING THE ENCOUNTER WITH THE WAVE**

**Oleksandr Kanifolskyi**

PhD., Docent of Department «Shipbuilding and Ship Repair.

named after prof. Vorobyev Yu.L.»

ORCID:0000-0001-7288-4835

e-mail:oleksandrkanifolskyi@gmail.com

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The article proposes a solution to the problem of calculating the values of longitudinal accelerations acting on the ship when it encounters a wave. In some IMO documents, the data obtained by research are given and proposed for calculating the strength of the means for securing the cargo on the ship. A theoretical basis for calculations related to the values of longitudinal accelerations has been created in this article. It is proposed to calculate such accelerations using a new formula for calculating the longitudinal force. This formula is obtained after analysing the expression for the Energy Wave Criterion (EWC), which is based on the ratio of the total wave energy and the kinetic energy of the vessel, and is similar to Newton's criterion. The total wave energy is calculated by representing the wave profile as a trochoid. The values of longitudinal accelerations were calculated and a comparison of these values with the results obtained by research was carried out. In order to compare the values of the force of the wave impact on the object, a comparative analysis was carried out using the Senflu method, which is used to assess the effect of waves on hydrotechnical structures.*

**Keywords:** *longitudinal accelerations, Energy Wave Criterion, force of wave impact.*

**Вступ.** Для проведення різноманітних розрахунків, під час проектування судна, або його експлуатації, необхідно мати інформацію про значення прискорень, що діють на цей плавучий об'єкт. Така інформація необхідна для розрахунків міцності елементів корпусу судна та кріплення вантажу, оцінки фізіологічного впливу хитами на стан екіпажу. Існують різні рекомендації, щодо цього питання, але єдиний підхід відсутній. Особливо це стосується значень горизонтальних поздовжніх прискорень.

Мета цієї статті – створення теоретичної бази, для розрахунку поздовжніх прискорень на борту судна, під час його зустрічі з хвилею.

**Основна частина статті.** В Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSS Code) [1] наведена інформація про поперечні, вертикальні та поздовжні прискорення, що виникають під час експлуатації. Значення поздовжніх прискорень пропонуються в межах від 2 м/сек<sup>2</sup> до 4.5 м/сек<sup>2</sup>.

При отриманні цієї інформації, був використаний досвід цілорічної експлуатації судна довжиною 100 м, в необмеженому районі плавання, швидкістю 15 вузлів. Для експлуатації в обмежених районах, пропонується використання коефіцієнтів, що враховують сезон та висоту хвиль. Значення прискорення були розраховані відповідно до формул резолюції MSC.5(48) [2].

Коефіцієнт зниження  $fR = 1 - \frac{(h_{1/3} - 13)^2}{240}$ , може застосовуватися для

значних висот хвиль  $h_{1/3}$ , що не перевищують 12 м, для проектування засобів кріплення в будь-якому з наступних випадків:

1. Необхідне кріплення розраховується для максимальної очікуваної двадцятирічної значної висоти хвилі в обмеженому районі.

2. Розраховується максимальна значна висота хвилі, яку може витримати конкретна система кріплення, і судно обмежується діяльністю лише на значній висоті хвилі до розрахованої максимальної.

3. Необхідні механізми кріплення розробляються для різних значних висот хвиль, і механізм кріплення вибирається відповідно до максимальної очікуваної висоти хвилі для кожного рейсу, для якого доступний точний прогноз погоди. Таким чином, тривалість плавання не повинна перевищувати 72 години або тривалість, прийняту Адміністрацією.

З розгляду формули коефіцієнта зниження  $fR = 1 - \frac{(h_{1/3} - 13)^2}{240}$  можна зробити висновок, що для розрахунків, для обмежених районів, можна використовувати висоту значної хвилі  $h_{1/3}$ , що дорівнює 12 м та менше.

Резолюція MSC.5(48) [2] пропонує наступний шлях розрахунку поздовжніх прискорень.

$$a_x = \pm a_0 \sqrt{0,06 + A^2 - 0,25A} \quad (1)$$

де  $A = \left(0,7 - \frac{L_0}{1200} + 5 \frac{z}{L_0}\right) \left(\frac{0,6}{c_B}\right)$ ;

$$a_0 = 0,2 \frac{v}{\sqrt{L_0}} + \frac{34 - \frac{600}{L_0}}{L_0};$$

$L_0$  – довжина судна;

$c_B$  – коефіцієнт загальної повноти;

$z$  – вертикальна дистанція від ватерлінії до центра ваги танку (позитивне значення вище ватерлінії).

У статті [3] розглянуто диференційне рівняння руху судна на хвилі, але відсутні рекомендації про значення поздовжніх прискорень.

Автори роботи [4] розглянули більшість існуючих методів для розрахунку додаткового опору води при зустрічі судна з хвилею, але не дали рекомендацій для розрахунку поздовжніх прискорень.

Стаття [5] містить цікаву інформацію про поведінку судна під час руху назустріч хвилі, дані про значення тиску для розрахунку слемінгу. В статті відсутні рекомендації про значення поздовжніх прискорень.

Розробка нової методики для розрахунку поздовжніх прискорень при зустрічі судна з хвилею допоможе більш точно оцінювати значення поздовжніх сил відповідно до реальних характеристик хвиль в заданому регіоні.

Зменшення кінетичної енергії судна буде пов'язане зі зменшенням швидкості судна. Передбачається, що після зустрічі з хвилею, швидкість судна  $v_2$  з масою  $m$  впаде до нуля

$$dE_s = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -\frac{mv_1^2}{2}. \quad (2)$$

По суті для подальших розрахунків можна використовувати значення кінетичної енергії судна з урахуванням приєднаних мас води

$$E_s = \frac{1.1mv^2}{2} = \frac{1.1\gamma c_B LBdv^2}{2}.$$

Рівняння, що пов'язує роботу сил, що діють на судно при зустрічі з хвилею (рис. 1), буде мати вигляд



Рис. 1. Схема зустрічі судна та хвилі [6]

$$\frac{1.1mv^2}{2} = -T_w + R_w + E_w, \quad (3)$$

де  $R_w$  – робота сил опору води;

$T_w$  – робота сили тяги;

$E_w$  – повна енергія хвилі.

Сили опору води та сила тяги мають протилежні напрямки, тому роботи, які вони виконують, мають різні знаки і компенсують одна одну до зустрічі з хвилею. Враховуючи те, що опір води та сила тяги при русі на хвилі, будуть змінювати свої значення, можна вважати, що ці дві сили, в середньому, будуть компенсувати одна одну. Зміна значень цих сил буде відбуватися за рахунок зміни площі змоченої поверхні, хитавиці, напрямку дії рушія, виходу з води рушія.

Існують наступні гіпотези про закономірності, за допомогою яких описують обрис профілю хвилі: синусоїдальна закономірність, трохоїдальна й циклоїдальна. Морські хвилі найбільш вдало можна описати за допомогою трохоїдальних хвиль [7] (рис. 2).

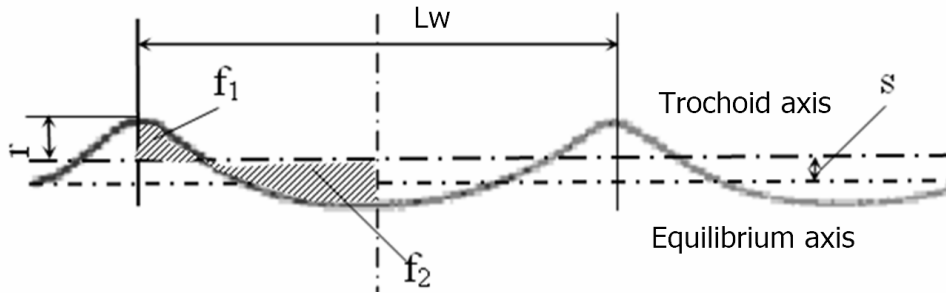


Рис. 2. Трохоїдальна хвиля

Усі подальші положення про енергію хвилі взяті з [7]. Енергія хвилі складається з кінетичної й потенційної. Якщо виділити в складі такої хвилі на глибині  $s$  шар товщиною  $dc$  й довжиною  $L_w$ , то можна записати для кінетичної енергії

$$dK = \frac{dmv^2}{2}.$$

Якщо записати вищенаведене рівняння з урахуванням радіуса орбіти  $r$ , яку описує частка рідини й кутової швидкості обертання рідких часток  $\sigma$ , то рівняння прийме наступний вид:

$$dK = \frac{\gamma L_w \sigma^2 r^2}{2g} dc, \quad (4)$$

де  $L_w$  – довжина хвилі;

$\gamma$  – щільність морської води.

Диференціал  $dc$  можна представити як диференціал радіуса  $\frac{dc}{L_w} = -\frac{dr}{2\pi r}$ .

Це рівняння являє собою рівність двох співвідношень. Ліва частина відношення товщини шару  $dc$  до довжини хвилі. Права частина – це відношення приросту радіуса орбіти частинки рідини  $dr$  до довжини описаного кола. Після підстановки в значення  $dc$  в (4) одержимо

$$dK = -\frac{\gamma L_w^2 \sigma^2 r}{4\pi g} dr. \quad (5)$$

Проінтегрувавши рівняння (5) у межах від  $r = r_0$  на поверхні рідини до  $r = 0$  на глибині загасання коливальних рухів рідини, одержимо рівняння у вигляді

$$K = -\frac{\gamma L_w^2 \sigma^2}{4\pi g} \int_{r_0}^0 r dr = \frac{\gamma L_w^2 \sigma^2}{8\pi g} r_0^2. \quad (6)$$

Значення кутової швидкості частки рідини  $\sigma = \sqrt{\frac{2\pi g}{L_w}}$ . Після підстановки цього значення у формулу (6), одержимо

$$K = \frac{\gamma L_w}{4} r_0^2. \quad (7)$$

Беручи до уваги, що висота хвилі рівна двом її радіусам  $h = 2r_0$ , приведемо формулу (7) до виду

$$K = \frac{\gamma L_w}{16} h^2. \quad (8)$$

Специфічність трохіодального хвилювання виражається в тому, що вісь трохіоди, при виникненні руху лежить вище, ніж вісь порівняння на величину  $s$  (рис. 3).

Потенційна енергія шару одиничної ширини, товщиною  $dc$  на довільній глибині визначається як

$$dP = \gamma L_w s dc = -\frac{\gamma s L_w^2}{2\pi r} dr. \quad (9)$$

Одне із властивостей трохіоди – це співвідношення площ профілю  $f_1$  й  $f_2$ . Перша площа менше другої на половину площі виробляючого круга радіусом  $r$ .

$$(f_2 - f_1) = \frac{\pi r^2}{2}. \quad (10)$$

Отже, відстань  $s$  обчислена в такий спосіб:

$$s = \frac{\pi r^2}{L_w}. \quad (11)$$

Після підстановки і наступного інтегрування отриманого диференціального рівняння, у межах від  $r = r_0$  на поверхні рідини до  $r = 0$  на глибині загасання коливальних рухів рідини, одержимо рівняння у вигляді

$$P = -\frac{\gamma L_w}{2} \int_{r_0}^0 r dr = \frac{\gamma L_w}{4} r_0^2. \quad (12)$$

Повна енергія трохгойдальної хвилі на одиницю ширини поверхні хвилі

$$E = K + P = \frac{\gamma L_w}{8} h_w^2 . \quad (13)$$

Після помноження (13) на прискорення вільного падіння та ширину судна, буде отримана повна енергія хвиль одиницях кНм.

В основі Energy Wave Criterion (EWC) лежить нерівність, що зв'язує кінетичну енергію судна і повну енергію хвилі, яка впливає на судно по ширині при зустрічних морських хвилях.

$$\frac{1,1mv^2}{2} \leq \frac{\gamma g k_w h_w^3}{8} B \quad (14)$$

Права частина нерівності  $\frac{1,1mv^2}{2} \leq \frac{\gamma g k_w h_w^3}{8} B$  отримується після перетворення математичного виразу для повної енергії хвилі, яка діє на ширину судна

$$E_w = \frac{\gamma g h_w^2 L_w}{8} B, \quad k_w = \frac{L_w}{h_w} .$$

При виведенні критерію було застосовано теорему подібності Бекінгема та отримано формулу

$$EWC = \frac{\gamma g k_w h_w^3 B}{4,4mv^2} \quad (15)$$

Будь-яку математичну залежність можна представити у вигляді  $i = b - a$  критеріїв, де  $b$  – кількість змінних,  $a$  – кількість одиниць. У нашому випадку кількість змінних чотири ( $m, v, h_w, B$ ), одиниць вимірювання три (кг, м, сек.). Кількість можливих критеріїв –  $i = b - a = 1$ .

Можливо використання EWC для визначення поздовжніх прискорень, які виникають при зустрічі судна з хвилею. Якщо порівнювати два критерія:

$$EWC = \frac{\gamma g k_w h_w^3 B}{4,4mv^2} \quad \text{та критерій Ньютона} \quad Ne = \frac{PL}{mv^2},$$
 то можна відзначити, що

частини цих критеріїв  $\frac{B}{mv^2}$  та  $\frac{L}{mv^2}$  пов'язані з визначальними лінійними

розмірами  $L$  та  $B$ , масою тіла та швидкістю. Частина рівнянь  $P$  та  $F = \frac{\gamma g k_w h_w^3}{4,4}$  є

сили. На значення сили хвилі  $F$  впливає висота хвилі та співвідношення довжини

хвилі і висоти. Нерівність (14) представляє співвідношення кінетичної енергії судна з приєднаними масами води та роботи сили, яку створює хвиля по ширині судна.

Для перевірки значення сили, що отримана за допомогою формули  $F = \frac{\gamma g k_w h_w^3}{4,4}$  був застосований метод Сенфлу. Цей метод використовується для

визначення дії хвиль на передню грань стінки, що має кут нахилу до горизонту більше ніж  $45^\circ$  та глибину  $h$  перед стінкою. Хвиля нерозбита, інтерферована. Дія хвилі на 1 пог.м довжини стінки з заданою висотою визначається за формулою

$$R_b = \gamma \left[ \frac{(H + h_0 + h_w)(H + a)}{2} - \frac{H^2}{2} \right], \quad h_0 = \frac{4\pi \left(\frac{h_w}{2}\right)^2}{L_w} \operatorname{cth} \frac{2\pi H}{L_w}, \quad a = \frac{h_w}{\operatorname{ch} \frac{2\pi H}{L_w}}.$$

Глибина  $h$  була прийнята рівною осадці судна. В результаті розрахунку, для судна, що описане в наступній частині цієї статті, при дії хвилі висотою 7 м, довжиною 105 м отримане значення  $R_b = 93$  т/пог.м. В випадку використання

формули  $F = \frac{\gamma g k_w h_w^3}{4,4}$ , при дії сили по ширині описаного судна з певною осадкою,

отримано значення  $R_b = 60$  т/пог.м.

Якщо значення сили розраховано, то можна визначити значення прискорення, що діє на тіло, та порівняти його з значеннями прискорень, які були отримані на базі спостережень на борту реального судна. В сучасній версії CSS Code, для дослідження прискорень, що діють на судно, обрано судно довжиною 100 м та швидкістю 15 вузлів. Для суден інших розмірів використовуються поправочні коефіцієнти. Подібний підхід використаний в International Convention on Load Lines. В цій Конвенції вводиться поняття про стандартне судно, з певними характеристиками [8].

Як було зазначено вище, сила, з якою хвиля впливає на судно, розраховується за формулою, кН

$$F = \frac{\gamma g k_w h_w^3}{4,4}. \quad (16)$$

Це впливає з порівнянь критерію Ньютона  $Ne = \frac{PL}{mv^2}$  та критерію

$$EWC = \frac{\gamma g k_w h_w^3 B}{4,4 m v^2}.$$

Масова водотоннажність судна

$$\Delta = \gamma c_B L B d. \quad (17)$$



Для розрахунку значення прискорень необхідна інформація про масу судна. Масова водотоннажність судна, що описане в [1], може бути розрахована на підставі співвідношень головних розмірів судна з нормальними морехідними якостями.

Для суден різних типів існують співвідношення головних розмірів, що забезпечують судну достатні морехідні якості. В сучасній літературі багато уваги приділяється вибору характеристик судна [9]. Для забезпечення ходовості тихохідному судну потрібне співвідношення довжини судна до ширини, що дорівнює шести. Таке співвідношення характерно для гарно обтічного тіла, з точки зору гідродинаміки. Співвідношення ширини судна до осадки зазвичай знаходиться в діапазоні від двох до чотирьох, що забезпечує судну достатню остійність. Коефіцієнт загальної повноти, для тихохідних суден приймає середнє значення 0,8. Якщо врахувати всі наведені вище міркування, то маса стандартного судна, довжиною 100 м, що згадане в нормативному документі [1], буде близько 8343 т.

Диференційне рівняння руху судна має вигляд

$$1,1m \frac{dv}{dt} = -T + R + F, \quad (18)$$

де  $T$  – сила тяги;

$R$  – опір води;

$F$  – сила, з якою хвиля впливає на судно.

Сили опору води та сила тяги мають протилежні знаки та будуть змінювати свої значення, під час руху на схвильованій поверхні. Ці дві сили, в середньому, будуть компенсувати одна одну. Перед зустріччю з хвилею, ці сили дорівнюють одна одній та судно рухається з певною швидкістю. Після зустрічі з хвилею сила опору зростає, зменшиться швидкість, сила тяги буде наближатися до значення тяги на швартовах.

Розрахунок поздовжніх прискорень можливий з формули

$$1,1ma_x = \frac{\gamma g k_w h_w^3}{4,4}. \quad (19)$$

На рисунку 3 показані результати розрахунків прискорень по запропонованій методиці та по правилам [1] при певному співвідношенню довжини хвилі до її висоти  $k_w = \frac{L_w}{h_w}$ .

В правилах [1] пропонується ще один, спрощений, метод розрахунку міцності кріплень. В цьому випадку, значення прискорень, що діють на вантаж, в горизонтальних напрямках, приймаються рівними прискоренню вільного падіння. Як видно з рисунку 3, при висоті хвилі близької до 12 м, значення поздовжнього прискорення наближається до значення прискорення вільного падіння.

Відношення довжини хвилі до її висоти  $k_w = \frac{L_w}{h_w}$  суттєво впливає на значення прискорень, що потрібно враховувати при розрахунках. Для висоти хвилі 12 м та  $k_w = \frac{L_w}{h_w} = 10$  розрахункові значення прискорень та пропозиції Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSS Code) співпадають.

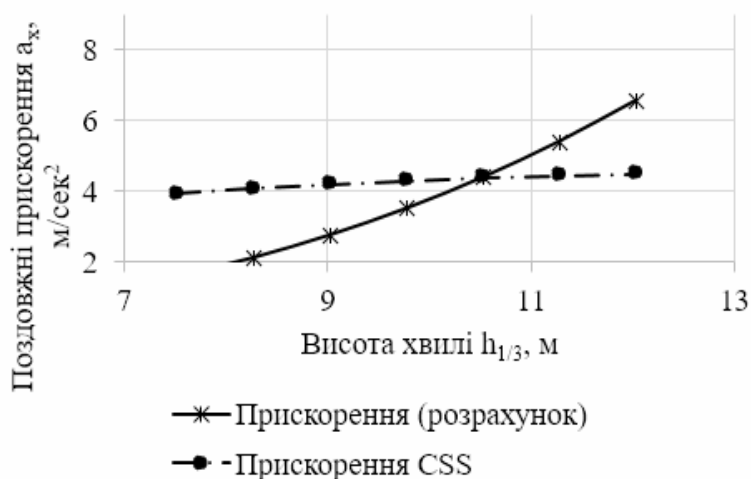


Рис. 3. Значення поздовжніх прискорень  $a_x$ ,  $k_w = \frac{L_w}{h_w} = 15$

**Висновки.** Запропонований в цій роботі новий метод оцінки значень поздовжніх прискорень допомагає більш точно визначити сили, що діють на корпус судна, механізми кріплення вантажу та екіпаж. При розрахунках можна чітко задати параметри хвиль, що діють в цьому районі. Така методологія дає змогу здійснювати диференційний підхід до кожного конкретного випадку, пов'язаного з експлуатацією судна в різних районах плавання, що в свою чергу приводить до ефективної оцінки умов роботи екіпажу та ефективного вибору засобів для закріплення вантажів. Проведено порівняльний аналіз отриманих значень прискорень та сили впливу хвилі на об'єкт з експериментальними даними та результатами, що виконані за допомогою гідротехнічних методів, таких, як метод Сенфлу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *International Maritime Organization (IMO). Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing CSS Code*. 2023. <https://marineregulations.dandocs.com>.

2. *Maritime Safety Committee. Resolution MSC. 5(48). Adoption of the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. 1983. <https://marineregulations.dandocs.com>.*
3. *Hossein Ghaemi, Hamid Zeraatgar, Mojtaba Barjasteh. Investigating Fuel Injection Strategies to Enhance Ship Energy Efficiency in Wave Conditions. Polish Maritime Research. 2024. <http://dx.doi.org/10.2478/pomr-2024-0009>*
4. *F. Petrez Arribas. Some Methods to Obtain the Added Resistance of a Ship Advancing in Waves. 2006. <https://doi.org/10.1016/oceaneng.006.06.002>*
5. *Daniel Veen, Tim Gourlay. A Combined Strip Theory and Smoothed Particle Hydrodynamics approach for Estimating Slamming Loads on a Ship in Head Seas. Ocean Engineering. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.026>.*
6. *Oleksandr Kanifolskyi, Larysa Krysiuk. New Area of Application of the Energy Wave Criterion (EWC): Determination of the Coastal Navigation Voyage. Journal of Marine Science and Technology. 2022. DOI: 10.1007/s00773-021-00829-7.*
7. *Alferyev M.Ya. Hydromechanics. River transport. 1961.*
8. *International Maritime Organization. International Convention on Load Lines. 1966.*
9. *Shumylo O., Yarovenko V., Malaksiano M., Melnyk O. Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters. Pomorstvo. 2023. <https://doi.org/10.31217/p.37.2.13>.*

*Стаття надійшла до редакції 20.05.2024*

**Посилання на статтю: Каніфольський О.О.** Метод розрахунку поздовжніх прискорень, що виникають на борту судна під час зустрічі з хвилею // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2024. № 2 (73). С. 7-17. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-7-17.

*Article received 20.05.2024*

**Reference a journal artic: Kanifolskyi Oleksandr.** Method of calculating the longitudinal accelerations occurring on board of the ship during the encounter with the wave // *Herald of the Odesa national maritime university*: Coll. scient. works, 2024. № 2 (73). P. 7-17. DOI 10.47049/2226-1893-2024-2-7-17.