

## ОЦІНКА РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН ЗА КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ ЇХ КОРПУСІВ

О.М. Шумило

к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

### Анотація

**Вступ.** Всесвітній круїзний ринок показує впевнене зростання. Це спонукає судноплавні компанії розробляти і реалізовувати стратегії щодо збільшення пасажиромісткості флоту, однією з яких є модернізація існуючих суден.

Модернізація, що зосереджується на збільшенні розмірів, – розмірна модернізація – повинна узгоджуватися з різними моделями забезпечення ефективності експлуатації судна: безпеки судна і судноплавства, функціональності й економічної ефективності.

Одним з основних факторів, що впливає на безпеку судна і судноплавства, є забезпечення міцності корпусу, якому Класифікаційні товариства надають надважливого значення. Провідні класифікаційні товариства світу, що входять до Міжнародної асоціації класифікаційних товариств, розробили універсальні умови для забезпечення подовжньої міцності корпусу, до яких долучився Регістр судноплавства України. Одним із ключових чинників, що забезпечує ці умови, є довжина судна.

Визначення оптимальної довжини судна і розміру циліндричної вставки становить велику проблему, рішенням якої є створення ґрунтовної математичної моделі модернізації судна, яка включає підмоделі безпеки судна, його функціональності й економічної ефективності. Ця математична модель має цільову функцію, виражену показниками економічної ефективності, всі інші підмоделі дають обмеження до цієї функції.

Одним із таких обмежень є максимальна довжина, яка допускається виходячи з критеріїв міцності корпусу. З огляду на вплив силових факторів, що змінюються внаслідок подовження, ця задача є досить складною.

У роботі проводиться дослідження щодо визначення максимальної допустимої довжини судна при його подовженні з урахуванням впливу силових факторів, які також залежать від збільшення довжини.

**Висновки.** Отримано алгоритм визначення граничної довжини судна, що забезпечується фактичним моментом опору корпусу судна або збільшеним моментом опору за рахунок допустимого підсилення конструкції в районі мідель-шпангоуту; визначено закономірності зміни відносних згинних моментів і відносних перерізуючих сил при прогині і перегині корпусу.

**Ключові слова:** пасажирське судно, розмірна модернізація, забезпечення міцності корпусу, безпека судноплавства.

ASSESSMENT OF THE DIMENSIONAL MODERNIZATION OF PASSENGER SHIPS BY THE CRITERION OF THEIR HULL STRENGTH

O.M. Shumylo

PhD in Engineering, Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation,

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

**Summary**

**Introduction.** The world cruise market shows a confident growth. This encourages shipping companies to develop and implement strategies to increase the passenger capacity of the fleet, one of which is the modernization of existing ships.

Modernization, which focuses on increasing the size – dimensional modernization, should be consistent with various models of ensuring the efficiency of ship operation: ship and shipping safety, functionality and economic efficiency.

One of the main factors affecting the safety of the ship and shipping is ensuring the strength of the hull, to which the Classification Societies pay great attention. The leading classification societies of the world, which are members of the International Association of Classification Societies, have developed universal conditions for ensuring the longitudinal strength of the hull, to which the Register of Shipping of Ukraine has joined. One of the key factors that ensures these conditions is the length of the vessel.

Determining the optimal length of the vessel and the size of the cylindrical insert is a big problem, the solution of which is the creation of a thorough mathematical model of the modernization of the vessel, which includes sub-models of the vessel's safety, its functionality and economic efficiency. This mathematical model has a target function expressed by indicators of economic efficiency, all other sub-models provide limitations to this function.

One of these limitations is the maximum length that is allowed based on the criteria of the strength of the case. Taking into account the influence of force factors that change as a result of elongation, this task is quite difficult.

In the work, a study is conducted on determining the maximum permissible length of the vessel during its lengthening, taking into account the influence of force factors, which also depend on the increase in length.

**Conclusions.** An algorithm was obtained for determining the maximum length of the ship, which is provided by the actual moment of resistance of the ship's hull or the increased moment of resistance due to the permissible strengthening of the structure in the area of the middle frame; the regularities of changes in relative bending moments and relative shearing forces during deflection and buckling of the hull are determined.

**Key words:** passenger ship, dimensional modernization, ensuring hull strength, navigation safety.

**Постановка проблеми і огляд літератури.** Рухаючись у морі, судна піддаються різноманітним навантаженням, які проєктувальники схематизують за різними силовими факторами і схемами їх прикладення, деформаціями і напруженнями, видами пружно-деформованого стану. Фахівцям із міцності корпусів під

час проведення їх конверсії необхідно якомога точніше визначити особливості навантажень конструкції і напрямок робочого навантаження, частоту виникнення, модель розподілу на таких конструкціях та закономірності їх зміни в результаті подовження судна.

Для суднових конструкцій характерно, що навантаження, які виникають в них, передаються поступово й перманентно від локальних елементів до сусідніх більших за розміром опорних елементів. Інженерна практика проектування корпусів накопичила великий досвід, який дозволяє систематизувати навантаження, що виникають з боку морського середовища: поздовжні, поперечні, місцеві навантаження. У відповідності до цієї систематизації проводять розрахунки на поздовжню, поперечну, місцеву міцність. Дані розрахунки стандартизовані провідними класифікаційними товариствами [1-12].

Морське середовище створює відповідну дію на корпус судна, яка проявляється у впливі статичного тиску морської води і динамічного тиску від удару хвиль і хитавиці.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є визначення впливу міцності корпусу судна на межі проведення його розмірної модернізації. Мета досягається при розгляді і вирішенні таких задач:

- 1) проведення аналізу впливу збільшення довжини корпусу на розрахункові навантаження, що діють на корпус пасажирського судна з боку морського середовища;
- 2) дослідження закономірностей дії подовження судна на ключові силові фактори, що впливають на міцність його корпусу;
- 3) визначення граничного розміру циліндричної вставки за критерієм загальної поздовжньої міцності судна.

**Виклад основного матеріалу.** Регістр судноплавства [1–10] встановлює правила, методики щодо визначення розрахункового навантаження, спричиненого дією моря, якими унормовуються розрахункові формули, рівняння, залежності, значення параметрів, що застосовуються при проектуванні нових суден, модернізації, ремонті, надзорі й технічному нагляді існуючих. До таких параметрів належить хвильовий коефіцієнт  $c_w$  – основний фактор розрахункових навантажень на корпус, спричинених дією моря, який розраховується за рівнянням [1. с. 35]

$$\begin{aligned}c_w &= 0,0856L \text{ при } L \leq 90\text{ м,} \\c_w &= 10,75 - \left[ (300 - L) / 100 \right]^{\frac{3}{2}} \text{ при } 90\text{ м} < L < 300\text{ м,} \\c_w &= 10,75 \text{ при } 300\text{ м} \leq L \leq 350\text{ м,}\end{aligned} \quad (1)$$

де  $L$  – довжина судна, м;

Проаналізуємо вплив збільшення довжини судна на діапазон значень, який може приймати коефіцієнт  $c_w$ , на прикладі круїзних лайнерів:

- *Birka Paradise* (ІМО номер 9273727,  $L=177$  м,  $B=28,0$  м,  $T=6,6$  м,  $GT=34728$  gt);
- *Fram* (ІМО номер 9370018,  $L=113,7$  м,  $B=20,2$  м,  $T=5,1$  м,  $GT=34728$  gt);
- *Seaborun Odissey* (ІМО номер 9417086,  $L=168,1$  м,  $B=26,0$  м,  $T=6,4$  м,  $GT=34728$  gt);

- *Color Fantasy* (ІМО номер 9278234, L=223,7 м, В=35,0 м, Т=7,0 м, GT=75000 gt);
- *MSC Opera* (ІМО номер 9250464, L=251,25 м, В=28,8 м, Т=6,6 м, GT=59000 gt);
- *Pride of America* (ІМО номер 9250464, L=287,49 м, В=32,2 м, Т=8,0 м, GT=80439 gt);
- *AIDA* (ІМО номер 9250464, L=193,3 м, В=27,6 м, Т=6,2 м, GT=38531 gt);
- *Проекту 1881-010-1* ( L=205 м, В=28,6 м, Т=9,46 м, GT=39939 gt).

На рис. 1 і рис. 2 показані граничні значення, що може приймати коефіцієнт  $c_w$  для розглянутих суден, аргументом для яких є відносно подовження їхніх корпусів. Результати розрахунків на цих графіках свідчать, що найбільше відхилення  $c_w$  досягається при найменшій початковій довжині  $L_0$ .

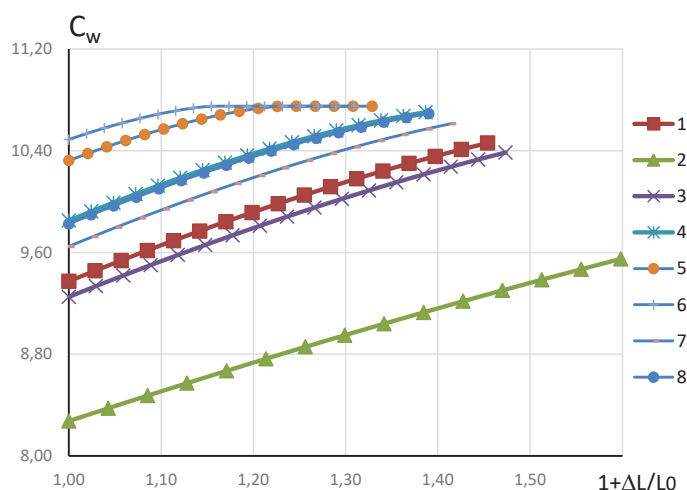


Рис. 1. Результати розрахунку хвильового коефіцієнту  $c_w$  залежно від подовження (у відносних одиницях) на прикладі таких суден: 1 – *Birka Paradise*; 2 – *Fram*; 3 – *Seaborne Odissey*; 4 – *Colore Fantasy*; 5 – *MSC Opera*; 6 – *Pride of America*; 7 – *AIDA*; 8 – *проект 1881*

Так, для лайнерів: «*Fram*» ( $L_0=113,7$  м), «*Seaborne Odissey*» ( $L_0=198,1$  м), «*Birka Paradise*» ( $L_0=177,1$  м) таке відхилення склало 10,5 % при збільшенні довжини на 40 %, «*AIDA*» ( $L_0=177,1$  м) – 9,2 % при збільшенні довжини на 40 %, «*Colore Fantasy*» ( $L_0=177,1$  м) і проекту 1881 ( $L_0=177,1$  м) – 8,6 % при збільшенні довжини на 40 %, «*MSC Opera*» ( $L_0=243$  м) – на 4 %; «*Pride of America*» ( $L_0=259$  м) – на 2,6 %. Крім того, як випливає з рівняння (1), при довжинах понад 300 м хвильовий коефіцієнт перестав зростати.

Наступне питання, яке слід проаналізувати, – це вплив зміни довжини судна на розрахунковий тиск, який сприймається корпусом судна від різноманітної дії на нього моря. Цей тиск розраховується за виразом [1, с. 36]

$$p = p_{st} + p_w, \quad (2)$$

де  $p_{st}$  – статичний тиск, кПа;

$$p_{st} = 10z \quad (3)$$

$z$  – відстань від точки, в якій діє тиск, до вантажної (літня марка) ватерлінії, м;

$p_w$  – розрахунковий хвильовий тиск, спричинений рухом судна по профілю хвилі [1, с. 36]

$$p_w = p_{w0} - 1,5c_w(z/d), \quad (4)$$

де  $p_{w0}$  – розрахунковий хвильовий тиск на борт корпусу в області конструктивної ватерлінії [1, с. 36],

$$p_{w0} = 5c_w a_v a_x, \quad (5)$$

$a_v$  – вертикальна проекція прискорення точки корпусу при ударі хвилі,  $m/c^2$ , [1, с. 36]

$$a_v = \left[ 0,8v_0(L/10^3 + 0,4)/\sqrt{L} \right] + 1,5, \quad (6)$$

$v_0$  – специфікаційна швидкість;

$a_x$  – горизонтальна проекція прискорення точки корпусу при ударі хвилі [1, с. 36],  $m/c^2$  ;

$$a_x = k_x(1 - 2x_1/L) \geq 0,267, \quad (7)$$

$k_x$  – коефіцієнт поперечних перерізів до носа та до корми від міделя відповідно;

$x_1$  – відстань поперечного перерізу, який розглядається, від найближчого (носового або кормового) перпендикуляра, м.

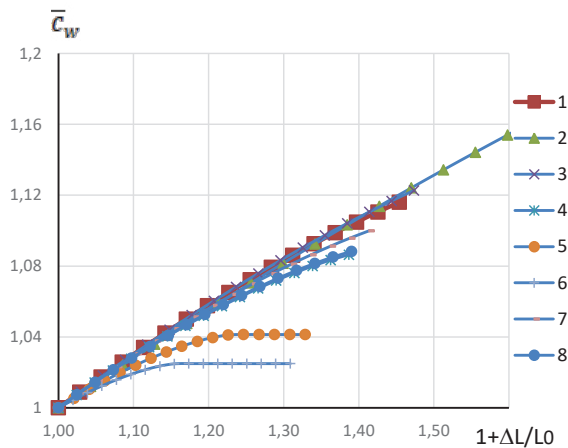


Рис. 2. Залежність відносного коефіцієнта  $\bar{c}_w$  від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

Виходячи з регламентованих Регістром [1] формул (3)-(7), отримаємо рівняння для визначення тиску  $p_w$  у загальному вигляді, яке відображає залежність  $p_w$  від довжини судна і дозволяє оцінити кількісно і якісно діапазон зміни тисків залежно від встановленої зміни довжин судна

$$p_w = 5c_w \left( \left[ 0,8v_0 \left( L / 10^3 + 0,4 \right) / \sqrt{L} \right] + 1,5 \right) (k_x (1 - 2x_1 / L)) - 1,5c_w (z / d) \quad (8)$$

Результати досліджень впливу подовження суден на хвильовий тиск  $p_w$ , що визначається за формулою (8), показані на рис. 3 і рис. 4. Для суден з найменшою початковою довжиною  $L_0$  спостерігається найменший тиск  $p_w$ , який зростає при максимальному збільшенні довжини в середньому на 23 кПа ... 25 кПа. З графіка рис. 4 випливає, що для семи з розглянутих суден відносний тиск  $\bar{p}_w = p_w / p_{w0}$  змінюється таким чином: збільшення відносної довжини судна  $L / L_0 = 1 + \Delta L / L_0$  на 10 %, 20 %, 30 % призводить до зростання  $\bar{p}_w$  на 10 %, 20 %, 30 %, тобто в діапазоні значень, для яких фактично проводять подовження суден на практиці. Разом із тим для суден з початковою довжиною меншою до 120 м...140 м (лайнер «Fram») така послідовність  $\bar{p}_w$  має занижені значення 9%, 18%, 27%.

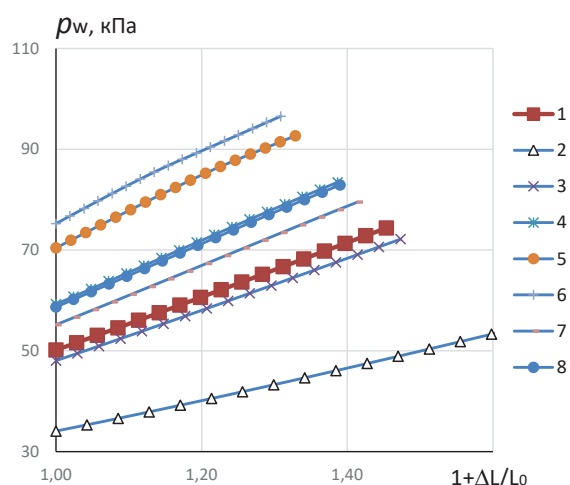


Рис. 3. Залежність розрахункового хвильового тиску, спричиненого рухом судна по профілю хвилі, від відносного подовження на прикладі таких суден:  
1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy;  
5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

На рис. 5. представлено результати визначення розрахункового тиску  $P$ , що визначався за формулою (2), які ілюструють зростання від початкової величини в середньому на 20 кПа ... 21 кПа.

Ключовим силовими факторами, що головною мірою впливають на загальну поздовжню міцність корпусу судна, є хвильові згинальні моменти і перерізуючі сили у поперечному перерізі. Правила, за якими визначаються ці фактори, були

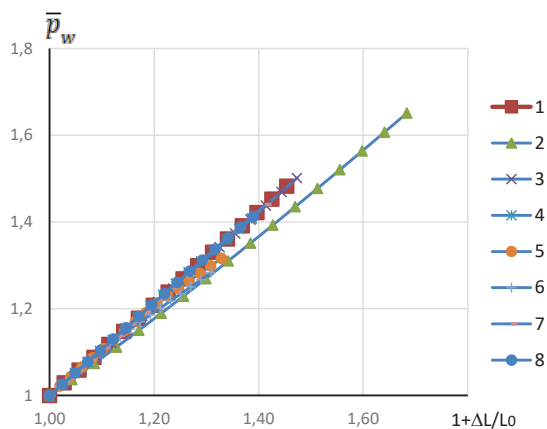


Рис. 4. Залежність відносного розрахункового хвильового тиску, спричиненого рухом судна по профілю хвилі, від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Colore Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

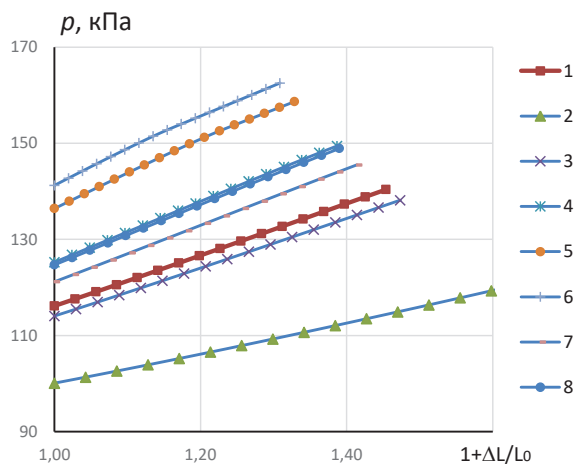


Рис. 5. Результати розрахунку повного тиску на корпус суден з боку моря від відносного подовження на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

стандартизовані Міжнародною асоціацією класифікаційних товариств (МАКТ) (International Association of Classification Societies (IACS)) в уніфікованих вимогах, прийнятих в 1989 році [2–10]. Загальну міцність судна визначають поздовжні силові навантаження, які проявляються через згинальні моменти, перерізуючі сили і крутні моменти, вплив крутних моментів є несуттєвим порівняно

з першими двома факторами. Навантаження, що визначають загальну поздовжню міцність корпусу, поділяються на дві категорії – статичні і динамічні.

Виникнення статичних згинальних моментів і перерізуючих сил спричинено місцевими (локальними) нерівностями між силами ваги та плавучості в умовах тихої морської води. Розрахунковий згинальний момент на тихій воді унормується правилами МАКТ і розраховується за формою [1–10], яку запишемо для початкової довжини судна

$$M_{sw0} = \pm 76 c_w B L_0^2 (C_{b0} + 0,7) 10^{-3}, \quad (9)$$

де  $C_{w0}$  – хвильовий коефіцієнт, що розраховується за залежністю (1);

$B$  – ширина судна, м;

$L_0$  – довжина судна до подовження, м;

$C_{b0}$  – коефіцієнт поздовжньої повноти.

Формула (9) при подовженні корпусу на величину  $L = L_0 + \Delta L$  має вигляд

$$M_{sw} = \pm 76 c_w B L^2 (C_b + 0,7) 10^{-3} = \pm 76 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7) 10^{-3}, \quad (10)$$

Відносне збільшення розрахункового згинального моменту на тихій воді визначається згідно з (9) і (10) виразом

$$\frac{M_{sw}}{M_{sw0}} = \frac{c_w L^2 (C_b + 0,7)}{c_w L_0^2 (C_{b0} + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7)}{c_w L_0^2 (C_{b0} + 0,7)} \quad (11)$$

Характер впливу подовження  $\Delta L$  судна на збільшення розрахункового згинального моменту представлено на рис. 6 у відносних одиницях зростання. Заслуговує на увагу той факт, що на ділянці подовження  $1 \leq 1 + \Delta L / L_0 \leq 1,2$  спостерігається досить тісний збіг результатів розрахунків для широкого кола суден з різними довжинами, водотоннажністю і осадками, в середньому згинальний момент збільшиться в 1,61 рази, розсіювання якого склало 0,04 одиниці.

Хвилювання моря призводить до появи динамічних поздовжніх навантажень – судно поступово переміщується на вершину хвилі, що викликає перегин корпусу і відповідні хвильові згинальні моменти і перерізуючі сили, які належним чином створюють деформації перегину і зсуву; потім воно переходить на підшову хвилі, що спричиняє прогин корпусу з відповідними згинальними моментами і перерізуючими силами і деформаціями. Такі навантаження і деформації діють циклічно під час руху судна від однієї хвилі до наступної, передаючи їх на балки конструкції і обшивку, що підпорядковується процесам забезпечення втомної міцності корпусу.

Як зазначалося раніше, провідними кваліфікаційними товариствами (МАКТ- IACS) приймаються однакові правила, за якими здійснюється визначення динамічного поздовжнього навантаження (згинних моментів і переізуючих сил). Згідно із цими правилами хвильовий згинальний момент  $M_w$ , який виникає у поперечному перерізі корпусу пасажирського судна і прикладається у вертикальній його площині, визначається за рівняннями [1–10], кН·м, що призводить до перегину корпусу судна з початковою довжиною



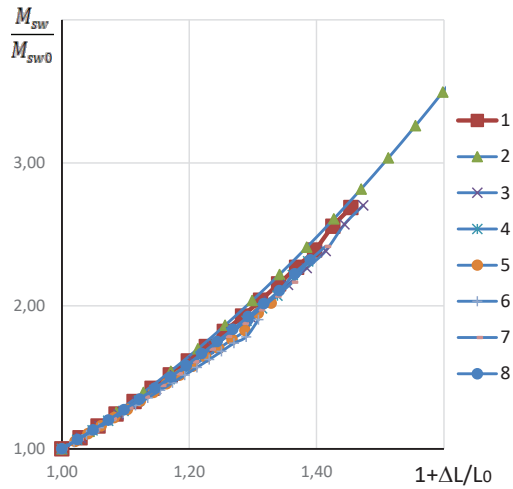


Рис. 6. Збільшення розрахункового згинального моменту корпусу судна на тихій воді залежно від його подовження, на прикладі таких суден:  
1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy;  
5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

$$M_{w0} = 190 c_{w0} B L_0^2 C_{b0} \alpha 10^{-3}, \quad (12)$$

і до його прогину

$$M_w = -110 c_w B L_0^2 (C_b + 0,7) \alpha 10^{-3}, \quad (13)$$

де  $c_{w0}$  – хвильовий коефіцієнт;

$B$  – ширина судна, м;

$L_0$  – довжина судна, м;

$C_{b0}$  – коефіцієнт загальної повноти;

$\alpha$  – коефіцієнт.

У разі подовження корпусу рівняння (12) і (13) будуть мати такий вигляд

$$M_w = 190 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 C_{b0} \alpha 10^{-3}, \quad (14)$$

$$M_w = -110 c_w B (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7) \alpha 10^{-3} \quad (15)$$

З метою аналізу впливу подовження судна на характер зміни хвильового згинального моменту застосуємо рівняння (12) і (14), розділимо їх – у результаті отримаємо вираз для визначення відносного згинального моменту при перегині корпусу

$$\frac{M_w}{M_{w0}} = \frac{c_w L^2 C_b}{c_{w0} L_0^2 C_{b0}} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 C_b}{c_{w0} L_0^2 C_{b0}}, \quad (16)$$

і аналогічно, застосовуючи формули (13) і (15), – вирази при прогині корпусу

$$\frac{M_w}{M_{w0}} = \frac{c_w L^2 (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0^2 (C_b + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L)^2 (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0^2 (C_b + 0,7)} \quad (17)$$

Результати розрахунків відносних моментів у варіантах перегину і прогину подані на рис. 7 і рис. 8 відповідно.

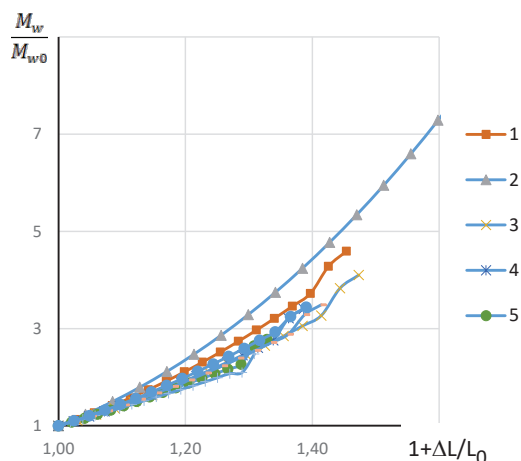


Рис. 7. Відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з перегиня корпусу залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

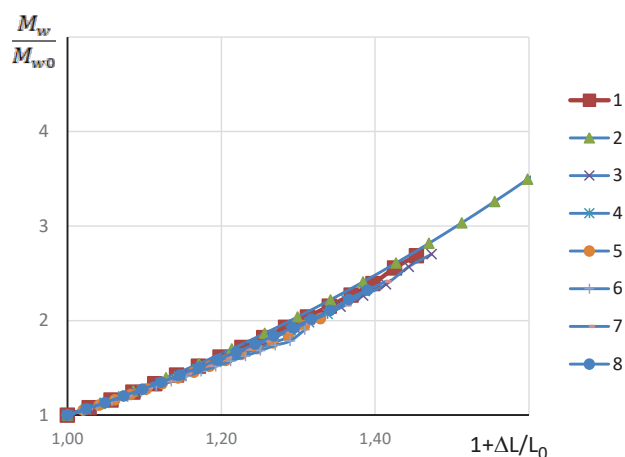


Рис. 8. Відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з прогином корпусу залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проєкт 1881

Детальний розгляд графіків рис. 7 і рис. 8 дозволяє зробити такі висновки: відносний розрахунковий згинальний момент вказаних суден при перегині корпусу при відносному подовженні  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,1$  змінюється в інтервалі 1,3...1,6, при  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,2$  – в 1,8...2,3, при  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,3$  – в 2,3 ...3,2, тобто зі збільшенням довжини судна розкид значень  $M_w / M_{w0}$  зростає. Разом з тим при прогині судна (рис.8) спостерігаються наступні результати – при відносному подовженні  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,1$  відношення  $M_w / M_{w0}$  змінюється в інтервалі 1,35...1,55, при  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,2$  – в 1,55...1,65, при  $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,3$  – в 1,75 ...2,0. Таким чином, при прогині судна відносне збільшення згинального моменту знаходиться у вузькому інтервалі значень для розглянутих суден із різними геометричними характеристиками (довжина, ширина, осадка, коефіцієнт повноти), експлуатаційними характеристиками (гросстонаж, пасажиромісткість).

Уніфіковані вимоги МАКТ до розрахунку хвильової перерізуючої сили у поперечному перерізі [1–10] представлені залежностями такого виду при початковій довжині судна:

при його перегині

$$N_{w0} = 30 c_{w0} B L_0 (C_{b0} + 0,7) f_1 10^{-2}, \quad (18)$$

і прогині

$$N_w = -30 c_{w0} B L_0 (C_{b0} + 0,7) f_2 10^{-2} \quad (19)$$

де  $f_1, f_2$  – коефіцієнт

Рівняння (3.18) і (3.19) при розрахунку перерізуючої сили з подовженням довжини  $L = L_0 + \Delta L$  корпусу будуть записані таким чином:

$$N_w = 30 c_w B L (C_b + 0,7) f_1 10^{-2} \quad (20)$$

$$\frac{N_w}{N_{w0}} = \frac{c_w L (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0 (C_{b0} + 0,7)} = \frac{c_w (L_0 + \Delta L) (C_b + 0,7)}{c_{w0} L_0 (C_{b0} + 0,7)} \quad (21)$$

Користуючись отриманою залежністю (21), визначимо відносну перерізуючу силу  $N_w / N_{w0}$  залежно від подовження судна. Результати розрахунків цієї сили показані на рис. 9. Для переліку суден, що представлені в широкому діапазоні довжин і водотонажностей, слід зазначити, що при подовженні їх на 10 % перерізуюча сила зростає на 18 % ... 20 %, тобто спостерігається щільне зростання цієї сили без істотного впливу геометричних характеристик. При подальшому збільшенні довжини на 20 % (цей діапазон часто застосовується при подовженнях) перерізуюча сила зростає в межах 24 % ... 29 %. Також варто зазначити: чим менша початкова довжина судна, тим більше відносне зростання перерізуючої сили (рис. 9): позиція 1, найвищий графік, – лайнер «Fram» ( $L_0=113,7$  м) і позиція 6, найнижчий графік, – *Pride of America* ( $L_0=287,49$  м).

Міцність корпусу судна, в тому числі і у разі проведення розмірної модернізації, забезпечується такими її складниками, що утворюють цілісну систему щодо забезпечення безпеки судноплавства: подовжня, поперечна і місцева міцність.

Ключовим аспектом у визначенні найбільшої довжини судна у разі проведення розмірної модернізації є забезпечення вимог поздовжньої міцності.

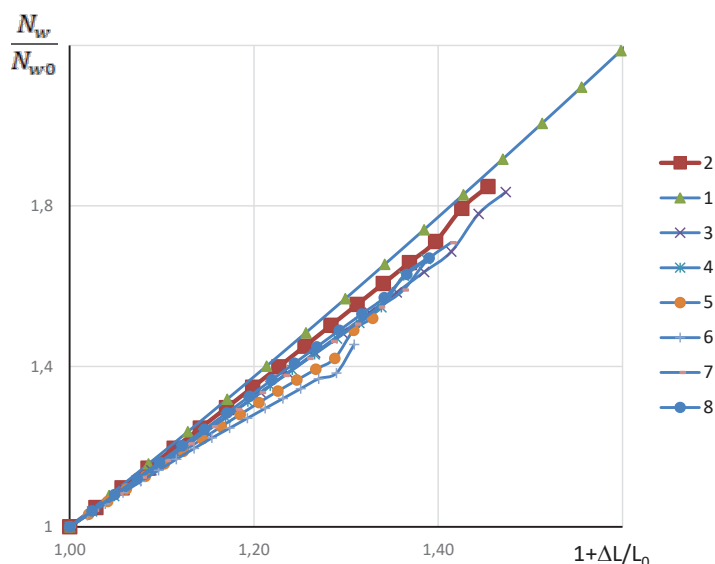


Рис. 9. Відносна розрахункова перерізуюча сила корпусу судна при хвилюванні залежно від його подовження, на прикладі таких суден: 1 – Birka Paradise; 2 – Fram; 3 – Seaborne Odissey; 4 – Color Fantasy; 5 – MSC Opera; 6 – Pride of America; 7 – AIDA; 8 – проект 1881

Регістр судноплавства регламентує умову забезпечення норм поздовжньої міцності корпусу судна [1-10, 14, 17]

$$W^{fact} \geq W, \quad (22)$$

$$W^{fact} \geq W^*, \quad (23)$$

де  $W^{fact}$  – фактичний момент опору корпусу судна (для палуби і днища відповідно), що визначається за аналізом еквівалентного бруса при його перетині по мідель-шпангоуту,  $\text{см}^3$ ;

$W$ ,  $W^*$  – необхідні моменти опору корпусу за критеріями міцності при перегині (hogging) і прогині (sagging),  $\text{см}^3$ .

Ці моменти опору в середній частині корпусу повинні бути не менші за [1-10] при перегині

$$W = \frac{M_{Theg}}{\sigma_{don}} = \frac{M_{sw} + M_w}{\sigma_{don}} 10^3, \quad (24)$$

і прогині

$$W^* = \frac{M_{Tsag}}{\sigma_{don}} = \frac{|M_{sw} + M_w^* + M_F|}{\sigma_{don}} 10^3, \quad (25)$$

де  $M_{Thog}$ ,  $M_{Tsag}$  – розрахунковий згинальний момент перегині і згині корпусу, кНм;

$M_F$  – згинальний момент при ударі хвиль об розвал бортів, який спричиняє прогин судна, для пасажирських суден має незначну дію, тому надалі не враховується.

$\sigma_{don}$  – допустимі напруження,  $\sigma_{don} = 175 / \eta$ ,

$\eta$  – коефіцієнт використання механічних властивостей.

Правилами Регістру передбачаються, крім виконання норм (22) і (23), такі вимоги до забезпечення подовжньої міцності перетину корпусу:

– фактичний момент опору повинен бути не меншим за мінімальний [1-10]:

$$W^{fact} \geq W_{min} = c_w B L^2 (c_b + 0,7) \eta \quad (26)$$

– фактичний момент інерції повинен бути не меншим за мінімальний [1-10]:

$$I^{fact} \geq I_{min} = 3c_w B L^3 (c_b + 0,7) \quad (27)$$

Таким чином, для забезпечення міцності корпусу при проведенні модернізації судна необхідно забезпечити виконання обов'язкових умов (22), (23), (26) і (27).

Міцність корпусу є важливою властивістю безпеки мореплавання і живучості судна. Збільшення довжини судна потребує визначення максимально допустимої довжини циліндричної вставки  $\Delta L$  саме за критерієм поздовжньої міцності (рис. 10) у разі, коли конструкція вставки відповідає конструкції основного корпусу, тобто коли її додатково не підсилюватимуть.

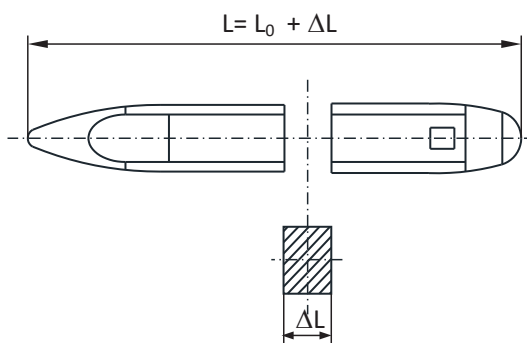


Рис. 10. Додавання до корпусу пасажирського судна циліндричної вставки

Процедуру оцінки величини  $\Delta L$  (рис. 10) пропонується здійснити виходячи з постулатів наук про міцність матеріалів і конструкцій, які передбачають, що після проектних розрахунків обов'язково проводяться перевірні розрахунки на

забезпечення відповідного рівня міцності. Таким чином, за додатковими умовами Регістру (26) і (27) будемо проводити проектні розрахунки щодо оцінки довжини вставки, а завершальні перевіріні розрахунки – за (22) і (24), (23) і (25).

З формули (26) визначимо допустиму довжину судна, приймаючи, що мінімальний момент опору дорівнює фактичному, визначеному за кресленням мідельшпангоуту,  $W_{min} = W^{fact}$

$$L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_w B(c_b + 0,7)\eta}} \quad (28)$$

Хвильовий коефіцієнт виразимо через його початкове значення  $c_{w0}$  і коефіцієнт відносного зростання  $\bar{c}_w$ , що можна орієнтовно визначити за рис. 2 –  $c_w = c_{w0}\bar{c}_w$ , внаслідок чого рівняння (28) приводиться до вигляду

$$L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)\eta}} \quad (29)$$

У свою чергу умова, що представлена, у вигляді рівняння (27) відкриває можливість підрахувати попередньо граничну довжину вставки за відповідним критерієм

$$L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_w B(c_b + 0,7)}} \quad (30)$$

Аналогічні міркування застосовується для рівняння (30), що дозволяє записати його у вигляді

$$L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)}} \quad (31)$$

Для того щоб визначити граничний розмір циліндричної вставки відповідно до рис. 10, рівняння (29) і (31) перетворюються таким чином

$$\Delta L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact}}{c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)\eta}} - L_0 \quad (32)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact}}{3c_{w0}\bar{c}_w B(c_{b0}\bar{c}_b + 0,7)}} - L_0 \quad (33)$$

Для отриманих граничних довжин за критеріями (29) і (31) визначається мінімальне значення

$$L = \min[L_1; L_2] \quad (34)$$

і відповідно  $\Delta L$

$$\Delta L = \min[\Delta L_1; \Delta L_2] \quad (35)$$

Після того як попередньо розраховано довжину  $L$ , здійснюється перевірний розрахунок за критеріями поздовжньої міцності корпусу (22) і (24), (23) і (25). Якщо умова виконується, то необхідно уточнити значення  $\bar{c}_w$  і  $\bar{c}_b$  і повторити розрахунок до виконання умови  $(W^{fact} - W_i) \geq \delta$  і  $(W^{fact} - W_i^*) \geq \delta$ , де  $\delta$  – необхідна точність, що узгоджується з Регістром. Алгоритм розрахунку граничної довжини показано на рис. 11.

Представлена задача вирішена для випадку, коли в площині мідель-шпангоуту не передбачається додаткових підкріплень еквівалентного бруса. За умови підсилення еквівалентного бруса (насамперед стрингерів і ширстрека та іншими конструктивними заходами) фактичний момент опору може бути збільшено на величину  $\Delta W^{fact}$ , у такому випадку рівняння (32) і (33) будуть записані в такому вигляді

$$\Delta L_1 = \sqrt{\frac{W^{fact} + \Delta W^{fact}}{c_{w0} \bar{c}_w B(c_{b0} \bar{c}_b + 0,7) \eta}} - L_0, \quad (36)$$

$$\Delta L_2 = \sqrt[3]{\frac{I^{fact} + \Delta I^{fact}}{3c_{w0} \bar{c}_w B(c_{b0} \bar{c}_b + 0,7)}} - L_0, \quad (37)$$

а умова забезпечення поздовжньої міцності буде представлена для перегину і згину

$$(W^{fact} + \Delta W^{fact}) \geq W, \quad (38)$$

$$(W^{fact} + \Delta W^{fact}) \geq W^*. \quad (39)$$

Для остаточного визначення граничної довжини у такому випадку застосовується алгоритм, що представлений на рис. 11. Згідно із цим алгоритмом процедура розрахунку граничної довжини судна проводиться таким чином:

- вихідні дані до розрахунку (блок 2): фактичний момент опору і момент інерції корпусу, коефіцієнт використання механічних властивостей, залежність хвильного коефіцієнта і коефіцієнта повноти корпусу від довжини судна,
- блок 3 прирівнює початкові значення хвильного коефіцієнта і коефіцієнта повноти корпусу, які визначені для довжини до модернізації, поточним значенням циклу;

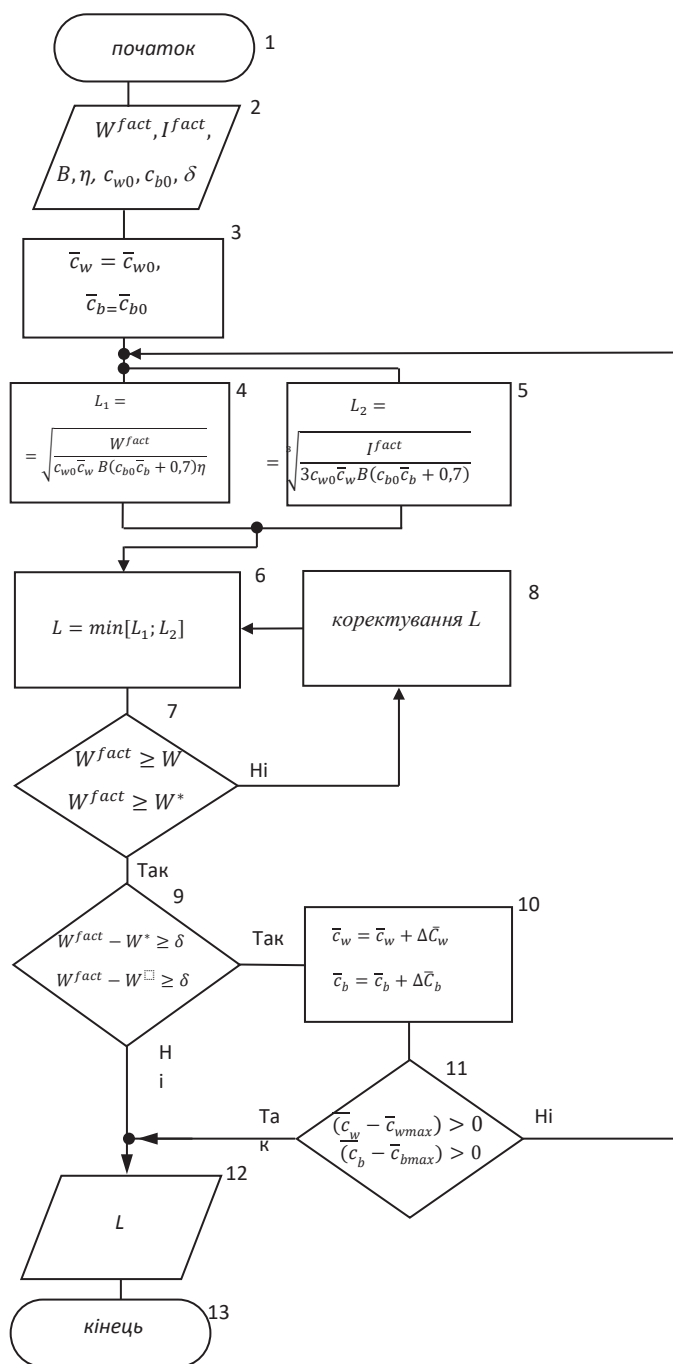


Рис. 11. Алгоритм розрахунку граничної довжини судна при його подовженні за критерієм поздовжньої міцності корпусу

– блоки 4 і 5 проводять розрахунки граничних значень довжини судна  $L_1$  і  $L_2$  згідно із забезпеченням обов’язкової умови за правилами Регістру щодо мінімального моменту інерції (26) і (27);



- блок 6 проводить визначення мінімальної довжини  $L_{min}$ ;
- блок 7 забезпечує перевірку виконання норм поздовжньої міцності корпусу при прогині і перегині корпусу за виразами (22) і (23);
- блок 8 виконує коригування довжини корпусу таким чином, щоб була виконана умова блоку 7;
- блок 9 перевіряє умову повноти використання фактичного моменту опору корпусу в порівнянні з необхідним моментом опору згідно з вимогою реєстру судноплавства;
- блок 10 здійснює перерахунок відносного хвильового коефіцієнта згідно із залежністю рис. 2.
- блок 11 виконує перевірку досягнення відносного хвильового коефіцієнта потоку; якщо вона не виконується, то повторюються процедури блоків 4-11.
- блок 12 виводить результати граничного подовження корпусу судна.

**Висновки.** Проаналізовано характер впливу збільшення довжини судна на розрахункові навантаження, що діють на корпус пасажирського судна з боку морського середовища. Найбільший вплив на зростання хвильового коефіцієнта має довжина судна, темпи його зростання найменші при досягненні довжини подовження в інтервалі 250 мм...300м; відносний хвильовий тиск зростає максимально наближено до прямо пропорційної залежності від відносної довжини.

Досліджено закономірності дії подовження судна на ключові силові фактори, що впливають на міцність його корпусу:

- значення відносного розрахункового згинального моменту на тихій воді характеризуються високою щільністю результатів (високим коефіцієнтом кореляції), тут спостерігається усереднене збільшення такого моменту на 50 % при зростанні відносної довжини на 20 %, на 100 % – при збільшенні цієї довжини в 30 %;
- відносний розрахунковий згинальний момент корпусу судна при хвилюванні з перегином корпусу залежно від його подовження має більше розсіювання результатів (зменшення коефіцієнта кореляції) при зростанні довжини на 20 % збільшується на 40 %...65 %, при зростанні довжини на 30 % – на 50 % ...100 %;
- відносна розрахункова перерізуюча сила збільшується таким чином: при зростанні довжини судна на 10 %, 20 %, 30 % – на 22%.. 27%, 28%.. 38%, 39%...59% відповідно.

Розроблено метод щодо визначення граничного розміру циліндричної вставки, до якої можливо проводити подовження, за критерієм загальної поздовжньої міцності судна, який ґрунтується на умовах міцності, які виражаються в забезпеченні фактичних моментів опору корпусу більших ніж необхідних при перегині і прогині, його мінімальних моментів опору і моментів інерції.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр судноплавства України (2020). Том 2. Київ.
2. Det Norske Veritas AS (DNV) (2023). Rules for classification of ships. Hull structural design – Ships with length 100 metres and above. Det Norske Veritas AS (DNV). Part 3 chapter 1. URL: <http://www.dnvgl.com> (дата звернення 01.12.2023)

3. Germanisher Lloyd (1993). Classification and construction rules. Marine engineering. Part 1. Sea vessels. Hull. Hamburg.
4. American Bureau of Shipping (2014). Rules for building and classing. Steel vessels. Part 3. Hull construction and equipment. Houston.
5. Italian Naval Register (RINA) (2019). Rules for the Classification of Ships. Part B. Hull and Stability. Genova .
6. Nippon Kaiji Kyokai (2023): Rules For Survey and Construction Of Steel Ships. Part C.
7. Korean Register (2022). Rules for the Classification of Steel Ships. Part 3. Hull Structures. BUSAN.
8. China classification society (2020). Rules for the Classification of Ships. Part 3.
9. Bureau veritas (2019). Rules for the Classification of Steel Ships. PART B – Hull and Stability.
10. Lloyd's Register (2020). Rules and Regulations for the Classification of Ships.
11. Yasuhisa Okumoto, Yu Takeda, Masaki Mano, Tetsuo Okada. (2009). Design of ship hull structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
12. Richard G.B. and Keith J.B. (2011). Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition, New York: McGraw Hill.
13. Шумило О.М. (2022). Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації. *Розвиток транспорту*. 1 (12), 89-104.
14. Tanaka, Y.; Ogawa, H.; Tatsumi, A.; Fujikubo, M. (2015). Analysis Method of Ultimate Hull Girder Strength under Combined Loads. *Ships Offshore Struct.* 10, 587–598.
15. Shumylo, O. (2023). Дослідження впливу розмірної модернізації на геометричні характеристики пасажирського судна. *Розвиток транспорту*, (2(17), 75-89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>
16. Shumylo, O. (2022). Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*, 4(15), 58-77. Retrieved із <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
17. Andreas, I. (2010). Ultimate Longitudinal Strength of Corroded and Damaged Bulk Carriers. Doctorate Thesis, “Dunarea de Jos” University of Galati, Galati.
18. World Journal of Engineering and Technology Vol.03 No.04(2015), Article ID:61617,20 pages 10.4236/wjet.2015.34029.

#### REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea vessels. Register of Shipping of Ukraine (2020). Volume 2. Kyiv.
2. Det Norske Veritas AS (DNV) (2023). Rules for classification of ships. Hull structural design – Ships with length 100 meters and above. Det

- Norske Veritas AS (DNV). Part 3 chapter 1. URL: <http://www.dnvgl.com> (accessed 01.12.2023)
3. Germanischer Lloyd (1993). Classification and construction rules. Marine engineering. Part 1. Sea vessels. Hull. Hamburg.
  4. American Bureau of Shipping (2014). Rules for building and classification. Steel vessels. Part 3. Hull construction and equipment. Houston.
  5. Italian Naval Register (RINA) (2019). Rules for the Classification of Ships. Part B. Hull and Stability. Genoa.
  6. Nippon Kaiji Kyokai (2023): Rules For Survey and Construction Of Steel Ships. Part C.
  7. Korean Register (2022). Rules for the Classification of Steel Ships. Part 3. Hull Structures. BUSAN.
  8. China classification society (2020). Rules for the Classification of Ships. Part 3.
  9. Bureau veritas (2019). Rules for the Classification of Steel Ships. PART B – Hull and Stability.
  10. Lloyd's Register (2020). Rules and Regulations for the Classification of Ships.
  11. Yasuhisa Okumoto, Yu Takeda, Masaki Mano, Tetsuo Okada. (2009). Design of ship hull structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
  12. Richard GB. and Keith J.B. (2011). Shigley's Mechanical Engineering Design, 9th edition, New York: McGraw Hill.
  13. Shumylo O.M. (2022). Determining the optimal length of passenger ships during their modernization. Transport development. 1 (12), 89-104.
  14. Tanaka, Y.; Ogawa, H.; Tatsumi, A.; Fujikubo, M. (2015). Analysis Method of Ultimate Hull Girder Strength under Combined Loads. Ships Offshore Struct. 10, 587–598.
  15. Shumylo, O. (2023). Study of the impact of dimensional modernization on the geometric characteristics of a passenger ship. Transport Development, (2(17), 75-89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>
  16. Shumylo, O. (2022). Optimization of dimensional modernization of passenger ships taking into account energy efficiency. Development of transport, (4(15), 58-77. Retrieved from <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
  17. Andreas, I. (2010). Ultimate Longitudinal Strength of Corroded and Damaged Bulk Carriers. Doctorate Thesis, “Dunarea de Jos” University of Galati, Galati.
  18. World Journal of Engineering and Technology Vol.03 No.04(2015), Article ID:61617,20 pages 10.4236/wjet.2015.34029.