

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.015

КОМП'ЮТЕРНО ОРІЄНТОВАНИЙ МЕТОД П'ЯТИ МОМЕНТІВ У РОЗРАХУНКАХ ЗГИНАННЯ СУДНОВИХ ПЕРЕКРИТТІВ

О.Є. Лугінін¹, С.В. Терлич², Р.Ю. Коршиков³

¹к.т.н., професор кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонська філія

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0001-7728-0579

²к.т.н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонська філія

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0002-6044-3087

³к.т.н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонська філія

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,
Херсон, Україна

ORCID ID: 0000-0003-6897-0234

Анотація

Вступ. На ранніх стадіях проектування суден, їх спуску зі стапеля, постановці в док та в навчальному процесі можуть бути використані наближені методи оцінки загальної та місцевої міцності суден. Запропоновано нову версію удосконаленого та універсалізованого методу п'яти моментів (М5М). **Метою** дослідження є розробка нової версії М5М для стержневої моделі згинання суднових перекриттів із вирішенням таких завдань: врахування в балочній моделі суднових перекриттів нерегулярності розміщення балок головного напрямку (БГН) та перехресних балок (ПБ) при їх непризматичності, довільності граничних умов, розподіленні навантаження на розглядувані балки; врахування деформації зсуву в стінках балок перекриття; врахування полосового навантаження від спускових доріжок та докового опорного пристрою (ДОП) під час докування суден. **Результати.** Розроблено комп'ютерно орієнтований метод розрахунку згинання суднових перекриттів з урахуванням їх особливостей у проектуванні суден, спуску зі стапелю та докуванні. **Висновки.** Розроблено алгоритм і розрахункову методику з розгляду задач розрахунку згинання перекриттів у процесі проектування суден, їх спуску з поздовжнього похилого стапелю та постановки в сухий або плавучий доки. Реалізована удосконалена балочна модель оцінки згинання суднових перекриттів на основі М5М, який поширений та універсалізований для практичних розрахунків з урахуванням таких факторів: нерегулярність розстановки балок

перекриття, довільності їх граничних умов; розподіл навантаження між балками обох напрямів і видів навантаження на перекриття; врахування деформації зсуву в стінках балок; врахування особливостей деформування днищових перекриттів суден під час їх спуску з похилого поздовжнього стапелю і докування за рахунок розгляду полосового навантаження балок.

Ключові слова: стержнева модель, метод п'яти моментів, згинання суднових перекриттів, проектування суден, спуск зі стапеля, докування.

COMPUTER-ORIENTED FIVE MOMENT METHODS IN CALCULATING THE BENDING FOR SHIP'S FLOORS

O.Ye. Luginin¹, S.V. Terlych², R.Yu. Korshykov³

¹PhD, Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair,
Kherson Branch

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-7728-0579

²PhD, Associate Professor at the Department Shipbuilding and Ship Repair,
Kherson Branch

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-2627-9463

³PhD, Associate Professor at the Department Shipbuilding and Ship Repair,
Kherson Branch

of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-6897-0234

Summary

Introduction. Approximate methods for assessing the overall and local strength of ships can be used in the early stages of ship design, launching, docking and training. A new version of the advanced and universalized five-point method (M5M) has been proposed. **Purpose.** The aim of the research is to develop a new version of M5M for the rod model of bending of ship floors with the following tasks: taking into account in the beam model of ship floors irregular placement of main beams (BGN) and cross beams (PB) beams; taking into account the shear deformation in the walls of the floor beams; taking into account the band load from the descent tracks and the docking support device (DOP) when docking vessels. **Results.** A computer-based method of calculating the bending of ship floors, taking into account their features in the design of ships, descent from the berth and docking. An algorithm and a calculation technique for considering the problems of calculating the bending of floors in the process of designing ships, their descent from a longitudinal inclined berth and installation in a dry or floating dock. Implemented a simplified beam model for estimating the bending of ship floors on the basis of M5M, which is common and universalized for practical calculations taking into account the following factors: irregular placement of floor beams, arbitrariness of their boundary conditions; load distribution between beams of both directions and types of load on the floor; taking into account the deformation of displacements in the walls of the beams; taking into account the peculiarities of deformation of the bottom floors of vessels during their descent from an inclined longitudinal berth and docking due to the consideration of the strip load of the beams.

Key words: rod model, the five-point method, bending of ship floors, ship design, descent from the building site, forging.

Вступ. У процесі проектування суден, а надалі їх спуску зі стапеля і постановки в док для виконання ремонтних робіт актуальною постає задача перевірки місцевої міцності суднових перекриттів (днищових, бортових, палубних) при розрахунку їх згинання. На ранніх стадіях таких робіт можуть бути використані наближені стержневі моделі такої задачі та методи їх реалізації. До складу цих методів належить відомий у будівельній механіці корабля *метод п'яти моментів* (М5М), заснований на теоремі п'яти моментів. Запропонована нова версія цього методу, узагальненого та універсалізованого з урахуванням особливостей у конструкції і деформуванні перекриттів. Використання такого наближеного методу дозволяє при невеликих витратах часу на підготовку вихідних даних і проведення розрахунків отримати оціночні результати, які надалі можуть бути уточнені з використанням більш досконалих підходів і методу скінчених елементів (МСЕ).

Формулювання цілей статті. На ранніх стадіях проектування суден, їх спуску зі стапеля, докування та в навчальному процесі виникає проблема отримання загальних оцінок місцевої міцності суднових перекриттів з урахуванням їх особливостей при мінімальних витратах часу отримання результатів.

Тому метою дослідження є розробка нової версії М5М для стержневої моделі згинання суднових перекриттів із вирішенням таких завдань: врахування в балочній моделі суднових перекриттів *нерегулярності розміщення балок* головного напрямку (БГН) та перехресних балок (ПБ) при їх *непризматичності, довільності граничних умов, розподіленні навантаження* на розглядувані балки; *врахування деформації зсуву* в стінках балок перекриття; *врахування полосового навантаження* від спускових доріжок та докового опорного пристрою (ДОП) при докуванні суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині в умовах проектування суден, їх спуску зі стапелю та постановки в док на основі нормативних документів [1; 2] наявні програмні комплекси з використанням МСЕ дають вичерпну інформацію в розрахунках як загальної, так і місцевої міцності суден та їх конструкцій [3; 4]. Але ці комплекси використовуються на останніх стадіях роботи і потребують значних витрат часу на підготовку вихідних даних, отримання та аналізу результатів розрахунків. У зв'язку з цим на проміжних стадіях розгляду міцносних проблем можуть бути використані спрощені наближені розрахункові моделі і методи їх реалізації, які при мінімальних витратах часу на підготовку вихідних даних і проведення розрахунків дозволяють отримати оціночні результати з достатньою для практики точністю.

Однак наявні наближені методи розрахунку згинання суднових перекриттів (наприклад, метод Нав'є, метод головних згинів, або метод Д.М. Ростовцева) мають особливі недоліки:

- обмежені розрахунковою схемою перекриття за чисельністю БГН та ПБ;
- не враховують фактори нерегулярності перекриттів за геометричними характеристиками балок та граничними умовами;
- реалізовані в низці випадків без урахування деформації зсуву у стінках балок, більш точного розподілу поперечного навантаження між ними, виду самого навантаження;

– у разі збільшення порядку система алгебраїчних рівнянь для визначення основних невідомих сама система стає погано зумовленою і з'являється загроза зниження точності обчислень за рахунок малих різниць близьких величин.

Універсальний метод розрахунку стержневих систем – метод скінчених елементів – хоча і враховує нерегулярність перекриттів за конструкцією та навантаженням, вимагає завдяки своїй універсальності значних витрат часу на підготовку великого обсягу вихідних даних, аналізу великого обсягу результатів обчислень.

Визначених недоліків значною мірою позбавлений за новою версією M5M [5]. Метод, що розглядається, поширений та уніфікований у роботах [7–9], доповнює дослідження [4] в задачі розрахунку загальної міцності суден під час їх докування.

Виклад основного матеріалу. Розрахункові схеми задач, які розглядаються у статті, в дослідженнях авторів засновані на розгляді багатопрогонної непрямої балки на пружних проміжних опорах i із коефіцієнтами податливості за прогинами A_i ($i = 1, \dots, n$) і пружньо затисненою в кінцевих перерізах із коефіцієнтами податливості за кутами повороту A_1 та A_n (рис. 1).

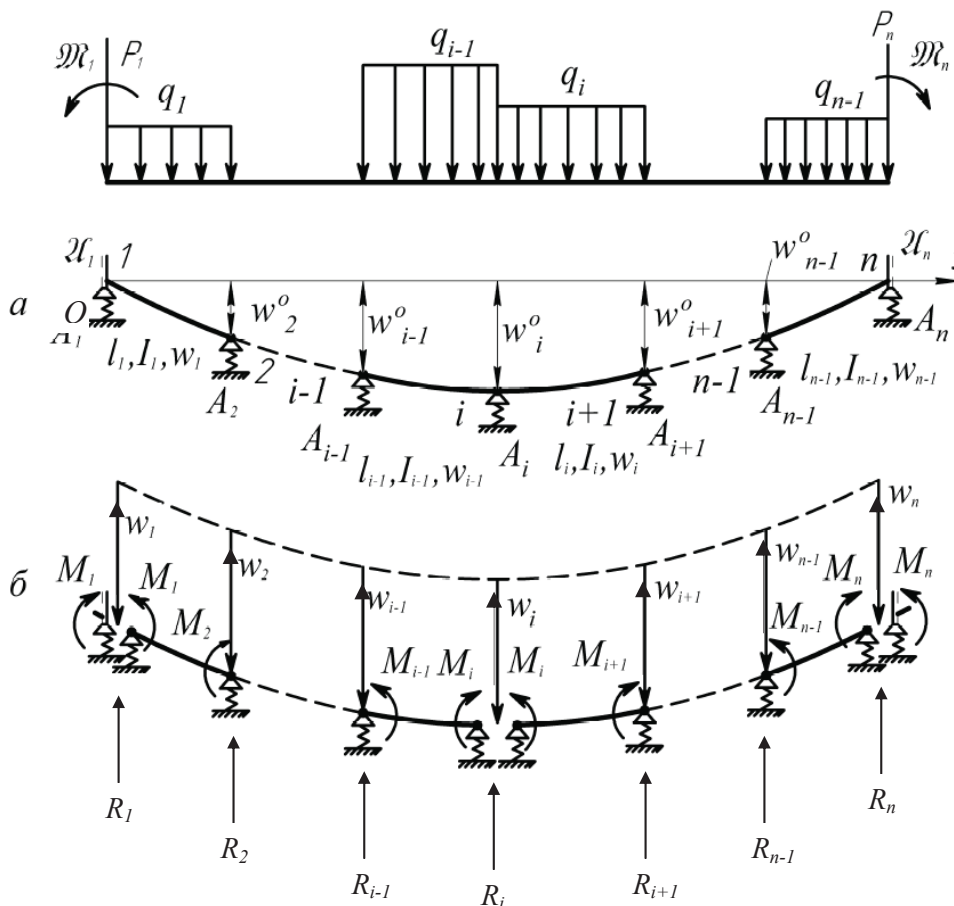


Рис. 1. Розрахункова схема багатопрогонної балки на пружних опорах
Джерело: власні розробки авторів

Розглядається балка, яка завантажена ступенево-рівномірним навантаженням у прогонах інтенсивністю q_i , а у кінцевих перерізах – зосередженими силами P_l та P_n і зовнішніми моментами M_l та M_n . Довжина прогонів l_i , момент інерції перерізів I_i та площі стінок балок ω_i у прогонах загалом різні. У загальному випадку багатопрогонна балка може мати початкові прогини w_i^0 на проміжних пружних опорах. При цьому враховуються такі випадки:

1) при зміщених пружних опорах просадки w_i^0 відраховуються від криволінійної вісі балки в початковому ненавантаженому стані до цієї вісі;

2) при розміщенні пружних опор уздовж координат лінії Ox та постановці на них криволінійної балки (наприклад при спуску судна з похилого поздовжнього стапеля або постановці судна в док) просадки w_i^0 відраховуються від координатної лінії Ox до вісі балки (рис. 2, 3, а).

У разі навантаження судна-балки пружні опори, які замінюють пружинну основу, отримують додаткові вертикальні переміщення w_i і займають положення, як це показано на рис. 2, 3, б, в.

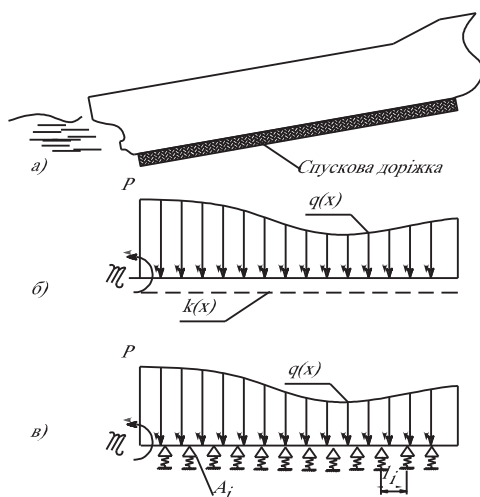


Рис. 2. До розрахунку згинання судна при спуску з поздовжнього стапеля
Джерело: власні розробки авторів

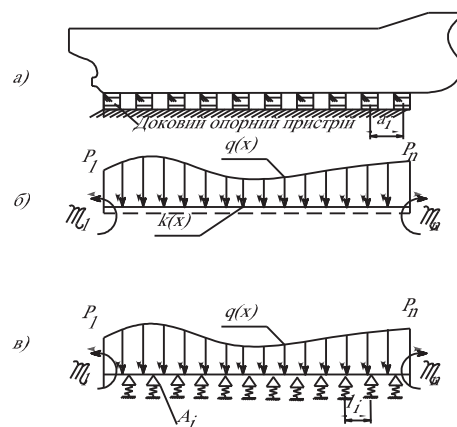


Рис. 3. До розрахунку згинання судна при постановці в док
Джерело: власні розробки авторів

На основі поширеного та універсального М5М при проектуванні суден реалізовані розрахункові схеми згинання перекриттів [5–9]: днищових (рис. 4), бортових (рис. 5) та палубних (рис. 6).

Днищове перекриття (рис. 4) загалом розглядається у трапецієдальному вигляді в плані довжиною L для ПБ, розміщених по ширині перекриття на довільних розмірах b_j , а БГН можуть бути розміщені за довільною або постійною шпациєю a_i . Враховується розподіл поперечного навантаження на перекриття: якщо число БГН $m < 5$, то інтенсивність навантаження на ці балки приймається величиною q_1 , а на ПБ – величиною q_2 , що впливає на значення вузлових реакцій R_{ji} [5].

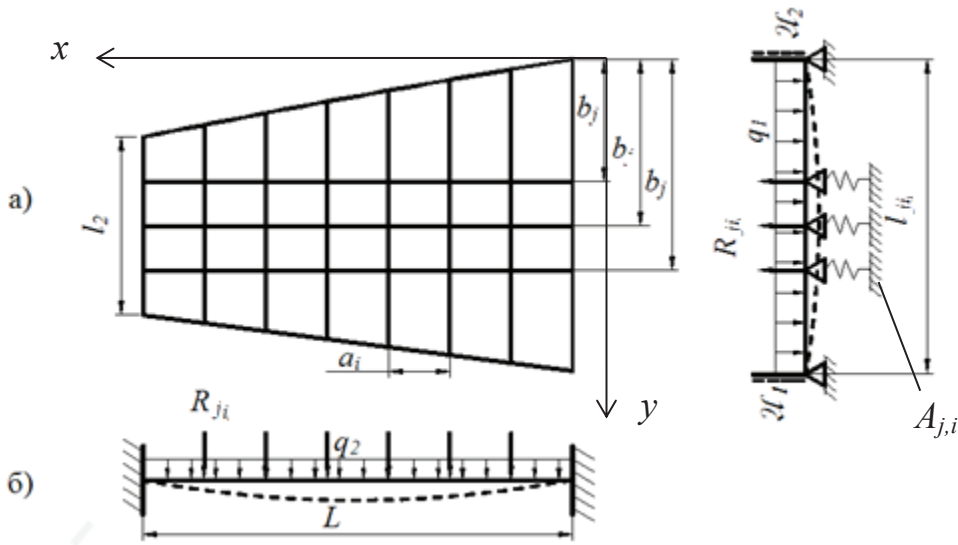


Рис. 4. Розрахункова схем днищового перекриття

Джерело: власні розробки авторів

На поперечних переділках судна, що обмежують перекриття, ПБ приймаються жорстко затисненими, а БГН по бортам – пружно затисненими з коефіцієнтами податливості A_1 та A_2 .

Бортове перекриття теж розглядається з нерегулярним розташуванням шпангоутів на відстанях a_i та бортових стрингерів на відстані b_j . Поперечне навантаження приймається за трапецієдальним законом від гідростатичного тиску води за значеннями інтенсивностей q_1 та q_2 (рис. 5).

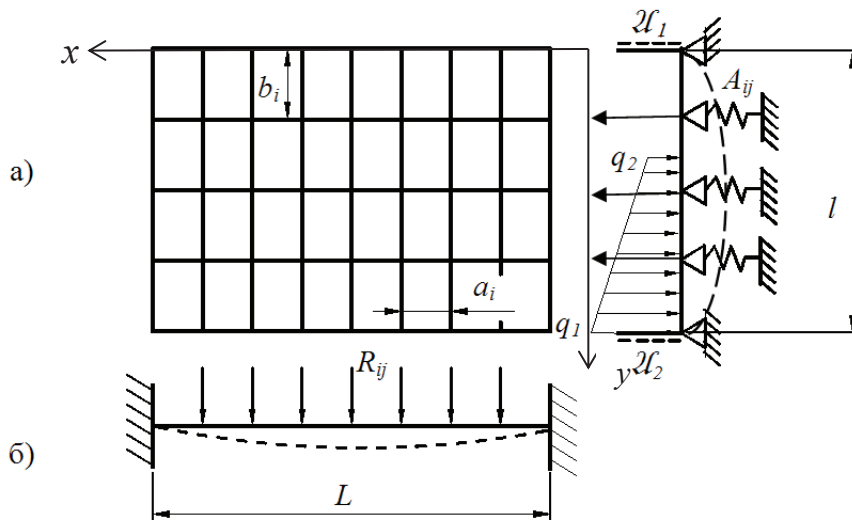


Рис. 5. Розрахункова схема згинання бортового перекриття

Джерело: власні розробки авторів

Палубне перекриття з люковим вирізом за розмірами c і d , підкріплене у кутах пілерсами, у загальному вигляді може мати нерегулярне розташування бімсів та полубімсів на відстанях a_i та карлінгсів-комінгсів (карлінгсів) на відстанях b_j . Поперечне навантаження на кришках люків приймається рівномірно розподіленим величиною інтенсивності q_1 (а при відсутності навантаження $q_1 = 0$), за межами люка та відсутністю навантаження на нього – інтенсивністю q_2 (рис. 6).

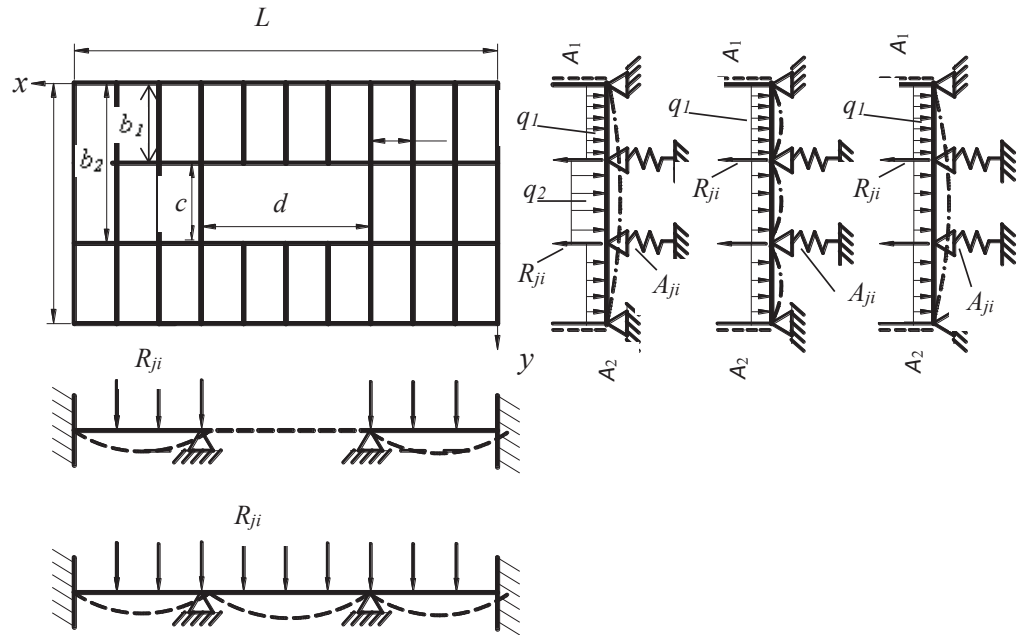


Рис. 6. Розрахункова схема згинання палубного перекриття
Джерело: власні розробки авторів

Запропонований М5М розрахунку згинання суднових перекриттів [5; 9], певною мірою позбавлений недоліків зазначених наближених методів, полягає в такому. БГН перекриттів (рис. 4-6) розглядаються як балки на пружних опорах, розташованих у вузлах перетину з перехресними в'язями. Своєю чергою ПБ підтримують БГН і завантажені вузловими реакціями R_{ji} . За основні невідомі в методі приймаються опорні згинальні моменти у вузлах БГН M_{ji} , а просадки пружних опор w_{ji} визначаються через елементи згинання ПБ. В цьому і полягає суть розробленого М5М для розрахунку згинання суднових перекриттів в оцінці їх місцевої міцності. Розглядувані перекриття (рис. 4-6) мають m БГН ($i = 1 - m$) та n ПБ ($j = 1 - n$). У загальному випадку перекриття є нерегулярними при наступних їх особливостях:

- балки обох напрямів у прогонах призматичні, але різні за їх довжиною з моментами інерції в перерізах I_i та I_j ;
- БГН та ПБ можуть розташовуватись на різних відстанях одна від одної a_i та b_j ;
- кінцеві перерізи БГН мають пружні затиснення на жорстких опорах із коефіцієнтами податливості пружних затиснень A_1 та A_2 , які можуть бути різними

для кожного контура першого та другого рівнів, а для ПБ – однаковими і жорстко затисненими на поперечних переділках корпусу судна; для днищових та палубних перекриттів опорним контуром першого рівня вважається правий борт (або права поздовжня переділка) і палуба для бортових перекриттів, а опорним контуром другого рівня – лівий борт (або поздовжня переділка) для днищових перекриттів і друге дно (або днище) для бортових перекриттів;

г) форма опорного контуру для днищових перекриттів у загальному вигляді трапецієдальна, а для бортових і палубних перекриттів – прямокутна;

г) у стінах балок береться до уваги деформація зсуву, коли висота нерозрізних балок більше $\frac{1}{10}$ їх довжини [5]; врахування деформації зсуву особливо доцільне для закритих днищових перекриттів типу «подвійного дна» в танкерів, чим частково компенсується нехтування жорсткістю балок на скручування та плоский напружений стан у настилах.

У загальному випадку зовнішнє навантаження сприймають у перекриттях як БГН, так і ПБ, але дослідження з цього приводу дають такі практичні рекомендації [6].

Для бортових перекриттів, на які діє гідростатичний та хвильовий тиск води за трапецієвидним законом, і днищових перекриттів із рівномірним тиском у межах опорного контуру при великій кількості БГН ($m > 5$) зовнішнє навантаження фактично сприймається тільки цими балками; ПБ завантажені у вузлах тільки реакціями взаємодії з БГН. Тоді інтенсивність навантаження в опорних перерізах визначають так:

а) для днищових перекриттів у перерізах першого та другого рівнів $q = p \cdot a$;

б) для бортових перекриттів у перерізах першого рівня $q_1 = p_1 \cdot a$, а другого рівня – $q_2 = p_2 \cdot a$, де p – рівномірний тиск на днищове перекриття; p_1 та p_2 – величина тиску на бортове перекриття на перерізах відповідно до другого рівня затиснення та рівня вантажної ватерлінії; a – величина шпациї.

Як показують дослідження [5], врахування розподілу навантаження між БГН і ПН днищових перекриттів помітно впливає на величину вузлових реакцій перекриттів з малим числом БГН ($m < 5$). Тому розподіл навантаження між балками перекриття у цьому випадку є таким:

а) повне навантаження та інтенсивність навантаження на БГН довжиною l :

$$Q_1 = pal \left(1 - \frac{n+1}{2} \cdot \frac{a}{l} \right), \quad q_1 = \frac{Q_1}{l}; \quad (1)$$

б) повне навантаження та інтенсивність навантаження на ПБ:

$$Q_2 = \frac{1}{2} pa^2 (m+1), \quad q_2 = \frac{Q_2}{a(m+1)} = \frac{1}{2} pa. \quad (2)$$

Алгоритм розрахунку згину перекриттів від дії поперечного навантаження складається з двох етапів: розкриття статичної невизначеності балок перекриття (перший етап); розрахунок елементів згину балок перекриття (другий етап).

На першому етапі розкривають статичну невизначеність стержневої моделі перекриття на підставі теореми п'яти моментів, застосованої до БГН з урахуванням ПБ, як пружних опор.

Розрахункова схема для БГН у районі вузла j, i показана на рис. 7.

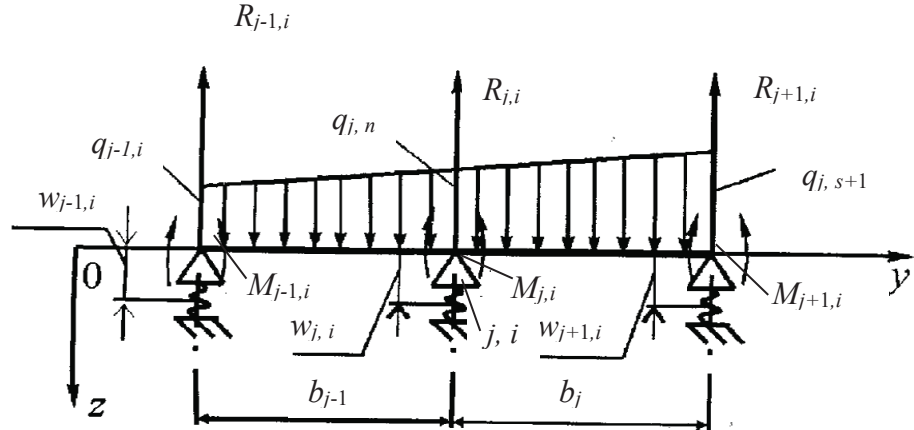


Рис. 7. Розрахункова схема для БГН

Джерело: власні розробки авторів

Цей вузол утворений перетинанням i -ї БГН з i -ю ПБ. З одного боку, на балку діє зовнішнє навантаження інтенсивністю $q(y)$, а з іншого – реакції пружних опор R_{ji} .

У місцях розташування пружних опор ординати інтенсивності трапецієвидного навантаження приймають проміжні значення q_s при $y = c_{s-1}$:

$$q(y) = q_1 + \frac{q_2 - q_1}{l} j, \quad (3)$$

де q_1 та q_2 – інтенсивності навантаження на крайніх ординатах їх дії; l – довжина балки.

При розкритті статичної невизначеності за «зайві» невідомі для балок головного напрямку приймаються опорні моменти M_{ji} у вузлових точках або далі вузлові моменти (рис. 7). Для їх визначення у вузлах складають умови сумісності кутових деформацій у вигляді:

$$\alpha_{j,j-1} = \alpha_{j,j+1}, \quad (4)$$

де $\alpha_{j,j-1}$ – кут повороту лівого опорного перерізу прогону $i-1$; $\alpha_{j,j+1}$ – кут повороту правого опорного перерізу суміжного прогону на їх спільній ij -й опорі.

Вирази для кутів поворотів в умовах (4) визначаються наступними залежностями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{j,j-1} &= -\frac{M_{j,i} b_{i-1}}{3EI_i} + \frac{M_{j-1,i} b_{j-1}}{6EI_i} - \alpha_{j,j-1}(Q_{i-1}) + \frac{w_{j,i} - w_{j,i-1}}{b_{j-1}} + \alpha_{3_1}^{\pi}, \\ \alpha_{j,j+1} &= -\frac{M_{j,i} b_i}{3EI_i} - \frac{M_{j+1,i} b_i}{6EI_i} + \alpha_{j,j+1}(Q_i) + \frac{w_{j+1,i} - w_{j,i}}{b_j} + \alpha_{3_2}^{\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Тут позначено: $M_{j-1,i}$, $M_{j,i}$, $M_{j+1,i}$ – опорні моменти у вузлах; $w_{j-1,i}$, $w_{j,i}$, $w_{j+1,i}$ – просадки пружних опор (вузлів); b_j , b_{j+1} – відстані між пружними опорами; I_i – момент

інерції перерізу i -ї БГН; $\alpha_{j,j-1}(Q_{i-1})$, $\alpha_{j,j+1}(Q_i)$ – кути повороту суміжних перерізів балки на їх загальній ji опорі від навантажень Q_{i-1} та Q_i у відповідних прогонах, які для трапецієвидного навантаження визначаються за формулами:

$$\alpha_{j,j-1}(Q_{i-1}) = \frac{(8q_i + 7q_{i-1})b_{j-1}^3}{360EI_i}; \quad (6)$$

$$\alpha_{j,j+1}(Q_i) = \frac{(8q_i + 7q_{i+1})b_j^3}{360EI_i}; \quad (7)$$

$\alpha_{3_1}^I$, $\alpha_{3_2}^I$ – кути повороту суміжних перерізів балки на їх загальній опорі, зумовлені деформацією зсуву:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{3_1}^I &= \frac{1}{b_{j-1}G\omega_j} (M_{j,i} - M_{j-1,i}); \\ \alpha_{3_2}^I &= \frac{1}{b_jG\omega_i} (M_{j+1,i} - M_{j,i}), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де G – модуль зсуву матеріалу балки.

Кути повороту пружних затиснень балок головного напрямку в опорних перерізах першого ($i = 0$) та другого ($i = m$) рівнів визначаються так:

$$\alpha_{0;j-1} = A_1 M_{i,0}, \quad \alpha_{m,m+1} = A_2 M_{j,m}, \quad (9)$$

де A_1 та A_2 – коефіцієнти податливості пружних затиснень.

Умови сумісності кутових деформацій (4) та (9) складають у вузлах і опорних перерізах БГН. З урахуванням симетрії конструкції та навантаження щодо поперечної осі, що проходить через середину перекриття, можна вважати, що значення номерів i лежить у діапазоні від 1 до m_p , де m_p – розрахункове число вузлових точок для i -ї БГН: $m_p = \frac{m+1}{2}$ при непарній кількості m балок головного напрямку; $m_p = \frac{m}{2}$ – при парній кількості цих балок. Тоді на підставі умов (4) та (9) складається $s = (n+2)m_p$ рівнянь відносно «зайвих» невідомих – опорних моментів M_{ji} у вузлових і кінцевих перерізах БГН. Однак у рівняння ввійде ще одна група невідомих – просадки пружних опор w_{ji} . Ці просадки виражають через прогини ПБ наступним чином.

Прогин у вузлі ji для j -ї перехресної балки при дії частини зовнішнього навантаження $Q_{n,\delta}$ та вузлових реакцій при R_{ji} , при $i = 1, \dots, m$, (рис. 7) обчислюється за формулою:

$$w_{ji} = \frac{L^3}{EI_j} \sum_{i=1}^m R_{ji} \cdot a_{ji} + \frac{Q_{n,\delta} L^3}{EI_j} b_j, \quad \text{при } j = 1, \dots, n, \quad (10)$$

де I_j – момент інерції перерізу j -ї ПБ; ji – номер вузла прикладення реакції R_{ji} ; a_{ji} – коефіцієнт впливу реакції R_{ji} прикладеної у вузлі ji перехресної балки, на прогін вузла ji цієї в'язі з урахуванням пружного затиснення кінцевих перерізів і деформацій зсуву; b_j – коефіцієнт впливу навантаження $Q_{n,\delta}$ на прогін вузла ji перехресної в'язі з урахуванням пружного затиснення кінцевих перерізів і деформацій зсуву; L – довжина ПБ; коефіцієнти впливу розраховуються за даними [5; 6].

При пружному затисненні кінців балок розрахунок зручно проводити з використанням коефіцієнта опорної пари $\alpha_3 = \frac{M_{ПЗ}}{M_{ЖЗ}}$, де $M_{ПЗ}$ – згинальний момент у перерізі при пружному затисненні кінців балки; $M_{ЖЗ}$ – згинальний момент при жорсткому затисненні її кінців. Цей коефіцієнт лежить у діапазоні $(0, \dots, 1)$, причому граничне значення $\alpha_3 = 0$ відповідає шарнірній опорі, а значення $\alpha_3 = 1$ – жорсткому затисненню.

Зв'язок коефіцієнта опорної пари α_3 з коефіцієнтом податливості пружного затиснення A_3 при симетричному навантаженні та симетричному закріпленні кінців балки з моментом інерції перерізу I_j та довжиною L здійснюється за формулою

$$\alpha_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2A_3 EI_j}{L} \right)}. \quad (11)$$

Оскільки згинальний момент у пружному затисненні пропорційний коефіцієнту опорної пари, а елементи згину балки є лінійними функціями від опорних моментів, то можна вважати елементи згину балки також лінійними функціями від α_3 . Тоді коефіцієнти впливу обчислюються за формулами:

$$a_{ji} = a_{ji}^{u3} (1 - \alpha_3) + a_{ji}^{ж3} \alpha_3; \quad (12)$$

$$b_j = b_j^{u3} (1 - \alpha_3) + b_j^{ж3} \alpha_3, \quad (13)$$

де a_{ji}^{u3} , b_j^{u3} – коефіцієнти впливу реакції R у вузлі ij перехресної в'язі на прогин вузла ji цієї ж в'язі, відповідно, при шарнірному закріпленні та жорсткому затисненні кінцевих перерізів; b_{ji}^{u3} та $b_{ji}^{ж3}$ – коефіцієнти впливу навантаження Q_{no} на прогин вузла ji перехресної в'язі при шарнірному закріпленні та жорсткому затисненні кінців.

Ці коефіцієнти визначаються на підставі довідникових даних [5; 6] як прогини однопрогонових балок, поділених на множник $\frac{L^3}{EI_j}$ при одиничному навантаженні:

$$\left. \begin{aligned} a_{ji}^{u.3} &= \frac{1}{6} \left(1 - i \frac{a}{L} \right) j \frac{a}{L} \left[1 - \left(1 - i \frac{a}{L} \right)^2 - j^2 \frac{a^2}{L^3} \right] + \left\| j \frac{a^3}{6L^3} (j-i)^3 + a_{C2}^{u.3}; \right. \\ a_{ji}^{ж.3} &= \frac{1}{6} \left(1 - i \frac{a}{L} \right) j^2 \frac{a^2}{L^2} \left[3i \frac{a}{L} - \left(2i \frac{a}{L} + 1 \right) j \frac{a}{L} \right] + \left\| j \frac{a^3}{6L^3} (j-i)^3 + a_{C2}^{ж.3}; \right. \\ b_j^{u.3} &= \frac{1}{24} j \frac{a}{L} \left(1 - 2j^2 \frac{a^2}{L^2} + j^3 \frac{a^3}{L^3} \right) + b_{C3}^{u.3}; \\ b_j^{ж.3} &= \frac{1}{24} j^2 \frac{a^2}{L^2} \left(1 - 2j \frac{a}{L} + j^2 \frac{a^2}{L^2} \right) + b_{C3}^{ж.3}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де $i = 1, \dots, p$; $j = 1, \dots, n$.

У залежностях (14) $a_{C2}^{u.3}$, $a_{C2}^{ж.3}$, $b_{C3}^{u.3}$, $b_{C3}^{ж.3}$ відповідають складникам коефіцієнтів впливу, що враховують деформації зсуву у стінках ПБ, і вони обчислюються за формулами [5]:

$$\left. \begin{aligned} a_{C2}^{u.3} &= 2(1+\mu) \frac{I_j}{l^2 \omega_{s,nb}} \left[\left(1-i \frac{a}{l}\right) j \frac{a}{l} - \left\| j \frac{a}{l} (j-i) \right\| \right]; \\ a_{C2}^{ж.3} &= 2(1+\mu) \frac{I_j}{l^3 \omega_j} \left\{ \begin{aligned} &\left(1-j \frac{a}{l}\right) i a \left(1-i \frac{a}{l}\right)^2 + i^2 \frac{a^2}{l} \left(1-i \frac{a}{l}\right) j \frac{a}{l} - \\ &-L \left(1-i \frac{a}{l}\right) \left[i \frac{a}{l} - \left(1+2i \frac{a}{l}\right) j \frac{a}{l} \right] + \left\| j a (j-i) \right\| \end{aligned} \right\}; \\ b_{C3}^{u.3} &= 2(1+\mu) \frac{I_j}{L^2 \omega_j} j \frac{a}{L} \left(1-j \frac{a}{L}\right), \\ b_{C3}^{ж.3} &= b_{C3}^{u.3}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де ω_j – площа стінки ПБ, a – постійна шпация.

Якщо деформація зсуву у стінках перехресних балок не враховується, то відповідні коефіцієнти впливу (15) приймаються рівними нулю.

Вузлові реакції R_{ji} , що входять у залежність (10), визначають через навантаження і опорні моменти БГН.

$$\left. \begin{aligned} R_{ji} &= R_{j-1,i} + R_{j+1,i}; \\ R_{j-1,i} &= R_{j-1,i} (Q_{j-1}) + \frac{M_{ji} - M_{j-1,i}}{b_{j-1}}; \\ R_{j+1,i} &= R_{j+1,i} (Q_j) + \frac{M_{ji} - M_{j+1,i}}{b_j}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де реакції опор однопрогонових балок від зовнішнього поперечного навантаження, розподіленого у загальному випадку за трапецієвидним законом, розраховуються на підставі залежностей [5]:

$$R_{j-1,i} (Q_{s-1}) = \frac{b_{j-1}}{6} (2q_j + q_{j-1}); \quad (17)$$

$$R_{j+1,i} (Q_j) = \frac{b_j}{6} (2q_j + q_{j+1}). \quad (18)$$

Тоді підстановка виразів для просадок пружних опор (10) в умови (4, 5) призводить до розрахункової системи неоднорідних алгебраїчних рівнянь відносно опорних моментів у вузлах M_{ji} . Ця система лінійних неоднорідних рівнянь m -го порядку відносно невідомих $M_{j,i}$ має вид:

$$\left. \begin{aligned} C_{1,1} M_{1,1} + C_{1,2} M_{1,2} + C_{1,3} M_{1,3} &= D_1; \\ C_{2,1} M_{2,1} + C_{2,2} M_{2,2} + C_{2,3} M_{2,3} + C_{2,4} M_{2,4} &= D_2; \\ C_{j,i-2} M_{j,i-2} + C_{j,i-1} M_{j,i-1} + C_{j,i} M_{j,i} + C_{j,i+1} M_{j,i+1} &= D_i; \\ C_{n-1,m-3} M_{n-1,m-3} + C_{n-1,m-2} M_{n-1,m-2} + C_{n-1,m-1} M_{n-1,m-1} + C_{n-1,m} M_{n-1,m} &= D_{n-1}; \\ C_{n,m-2} M_{n-2} + C_{n,m-1} M_{n,m-1} + C_{n,m} M_{n,m} &= D_m, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

де $j = 3 - (n - 2)$, $i = 3 - (m - 1)$, а також використовуються позначення:

$$\left. \begin{aligned} C_{j,i-2} &= a_{j-2} a_{j-1} \theta_{j-1}; \\ C_{j,i-1} &= \lambda_{j-1} m_{j-1} - a_{j-1} \theta_{j-1} (a_{j-2} + a_{j-1}) - a_{j-1} \theta_j (a_{j-1} + a_j); \\ C_{j,j} &= 2(\lambda_{j-1} S_{j-1} + \lambda_j S_j) + a_{j-1}^2 \theta_{j-1} + (a_{j-1} + a_j)^2 \theta_j + a_j^2 \theta_{j+1}; \\ C_{j,j+1} &= \lambda_j m_j - a_j \theta_j (a_{j-1} + a_j) - a_j \theta_{j+1} (a_j + a_{j+1}); \\ C_{j,j+2} &= a_j a_{j+1} \theta_{j+1}, \quad j = 1 - n; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} D_i &= \lambda_j (\beta_{j,j+1} + 6\Delta_j M_j) - \lambda_{j-1} (\beta_{j,j-1} + 6\Delta_{j-1} M_{j-1}) + F_j (w_{j+1}^0 + w_j^0) - \\ &- F_{j-1} (w_j^0 - w_{j-1}^0) + a_{j-1} \theta_{j-1} l_i [R_{j-1,i-2} (Q_{j-2}) + R_{j-1,i} (Q_{j-1})] - \\ &- (a_{j-1} + a_j) \theta_j l_i [R_{j,i-1} (Q_{j-1}) + R_{j,i+1} (Q_j)] + \\ &+ a_j \theta_{j+1} l_i [R_{j+1,i} (Q_j) + R_{j+1,i+2} (Q_{j+1})], \quad j = 1 - n. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

У формулах (20) та (21) використано такі залежності та позначення:

$$\left. \begin{aligned} \theta_j &= \frac{6EI_1}{l_1^3} A_j; \quad j = 1 - n; \quad \lambda_j = \frac{I_1}{I_j} \cdot \frac{l_j}{l_1}; \quad a_j = \frac{l_1}{l_j}; \quad \Delta_j = \frac{2(1+\mu)I_j}{l_j^2 \omega_j}; \\ S_j &= 1 + 3\Delta_j; \quad m_j = 1 - 6\Delta_j; \quad F_j = \frac{6EI_j}{l_j^2} \lambda_j, \quad j = 1 - (n-1); \\ \lambda_0 &= 6 \frac{EI_1}{l_1} A_1; \quad \lambda_n = 6 \frac{EI_1}{l_1} A_2; \quad S_0 = S_n = m_0 = m_n = 1; \\ \beta_{j,i-1} &= 6 \frac{EI_{j-1}}{l_{j-1}} \alpha_{j,i-1} (Q_{j-1}), \quad i = 2 - n; \quad \beta_{j,i+1} = 6 \frac{EI_j}{l_j} \alpha_{j,i+1} (Q_j), \quad j = 1 - (n-1); \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

E – модуль пружності матеріалу балки; μ – коефіцієнт Пуассона.

У залежностях (21)...(22) величини, які утворилися поза межами балки, приймаються рівними нулю; зокрема, варто прийняти:

$$\left. \begin{aligned} a_{-1} = a_0 = a_n = a_{n+1} = 0; \quad \beta_{1,0} = \beta_{n,n+1} = 0; \quad \theta_0 = \theta_{n+1} = 0; \quad F_0 = F_n = 0; \\ R_{0,-1} (Q_{-1}) = R_{0,1} (Q_0) = R_{j,0} (Q_0) = R_{n,n+1} (Q_n) = R_{n+1,n+2} (Q_{n+1} = 0); \\ C_{1,-1} = C_{1,0} = C_{2,0} = C_{n,n+1} = C_{n,n+2} = C_{n-1,n+1} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

У результаті розв'язання системи рівнянь (19) розкривається статична невідзначеність стержневої моделі перекриттів із розрахунком опорних моментів M_{ji} :

$$\left. \begin{aligned} R_{j,i} &= R_{j-1,i} + R_{j+1,i}, \quad j = 1 - n, \quad i = 1 - m; \\ R_{j-1,i} &= R_{j-1,i} (Q_j) + \frac{M_{ji} - M_{j,j-1}}{C_{j-1}}; \\ R_{j+1,i} &= R_{j+1,i} (C_j). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

На другому етапі задачі розрахунку згинання суднових перекриттів визначаються реакції R_{ji} (16) та просадки опор (10) w_{ji} .

За результатами розрахунку визначаються найбільш навантажені перерізи балок зі знаходженням максимальних значень, перерізуючи сил N_{\max} , згинальних моментів M_{\max} , нормальних напружень та дотичних напружень із перевіркою місцевої міцності балок перекриття.

За формулами алгоритму (1)-(24) створено комплекс комп'ютерних програм [5; 7-9] згинання суднових перекриттів із використанням М5М, які може бути використано на ранніх стадіях проектування з урахуванням їх особливостей за конструкцією та умовами деформування.

Задача про розрахунок згинання днищових перекриттів з урахуванням їх особливостей була подовжена у випадках спуску суден із поздовжнього похилого стапелю та постановок суден у сухий або плавучий доки для здійснення ремонтних робіт. Хоча в роботі [4] зазначено, що місцева міцність днищових перекриттів при докуванні, звичайно, забезпечується, але це не завжди пов'язано із задачами спуску суден із поздовжнього похилого стапелю та докувань суден зі значними звісами кінцевостей суден за межі ДОП.

Так, необхідно мати на увазі [8; 9], що під час спуску суден із поздовжнього стапелю та докування БГН днищового перекриття отримують навантаження інтенсивністю $q = \frac{D_1}{l}$ – при спусканні суден, де D_1 – спускова вага судна; l – довжина БГН (ширина перекриття); $q = \frac{D_2}{l}$ – при постановці судна в сухий док, де D_2 – докова вага судна; $q = \frac{D_2 + \gamma V}{l}$ – при постановці суден у плавучий док, γV – сила підтримки з боку води в доку. Полосове навантаження ДОП, яке сприймає ПБ від реакцій у місцях перетину з БГН, замінюється еквівалентним розподілом навантаження реакцій ДОП [8; 9] $q_1 = \frac{R_{jCP}}{b_{jCP}}$, де R_{jCP} – осереднені реакції

ДОП за осередньою відстанню між кільблоками b_{jCP} у межах перекриття. Реакції полосового навантаження на ПБ перекриття від спускової доріжки інтенсивністю q_2 також слід розглядати через осереднені значення реакцій ПБ у місцях розміщення БГН. Розроблено комплекс комп'ютерно орієнтованих програм на основі М5М у задачах спуску суден та постановці в док.

Треба також зауважити, що, окрім забезпечення міцності балок днищових перекриттів, у процесах спуску судна з похилого поздовжнього стапелю і постановці в док треба контролювати відсутність втрати стійкості ослаблених вирізами стінок флорів, вертикального кіля, стрингерів, які зазнають значних стискаючих локальних навантажень. Виконання відповідних розрахунків стійкості цих елементів суднових днищових конструкцій із визначенням фактичних коефіцієнтів запасу стійкості [10] забезпечить безаварійну експлуатацію і ремонт суден.

Висновки. Розроблено алгоритм і розрахункову методику з розгляду задач розрахунку згинання перекриттів у процесі проектування суден, їх спуску з поздовжнього похилого стапелю та постановки в сухий або плавучий доки для виконання ремонтних робіт. Реалізована наближена балочна модель оцінки згинання суднових перекриттів на основі М5М, який поширений та універсалізований для практичних розрахунків з урахуванням таких факторів: нерегулярність розстановки балок перекриття, довільність їх граничних умов; розподіл навантаження

між балками обох напрямів і видів навантаження на перекриття; врахування деформації зсуву в стінках балок; врахування особливостей деформування днищових перекриттів суден при їх спуску з похилого поздовжнього стапелю і документування за рахунок розгляду полосового навантаження балок.

ЛІТЕРАТУРА

1. РД 5.1033-80. Спуск судов. Прочность корпусов и спусковых устройств (1980). Москва : Изд-во стандартов. 165 с.
2. РД 5-076.011-82. Методические указания. Методы расчёта прочности. Расчёт на ЭВМ общей и местной прочности кораблей и судов при постановке в сухой и плавучий доки (1982). Ленинград : Судостроение. 237 с.
3. Козляков В.В., Финкель Г.Н., Хархурим И.Я. Проектирование доковых опорных устройств. Учебное пособие. Ленинград : Судостроение, 1973. 176 с.
4. Антоненко С.В. (2008) Обеспечение прочности, остойчивости и непотопляемости судов при ремонте. Владивосток : ДВПИ. 231 с.
5. Сердюченко А.М., Лугінін О.Є., Коршиков Р.Ю. та ін. Основи теорії пружності, будівельної механіки, міцності та вібрації суден. Навчальний посібник. Миколаїв : Видавництво НУК, 2012. 424 с.
6. Палий О.М. Справочник по строительной механике корабля. В 3-х томах. Ленинград : Судостроение. 1982. Т. 1. 376 с.
7. Лугінін О.Є., Філатова Н.А. Універсалізація використання методу п'яти моментів в розрахунках згину суднових перекриттів на ПК. *Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд* : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 20–21 травня 2018 р. Миколаїв : Видавництво «Торубара В.В.», 2018. С. 114–116.
8. Лугінін О.Є., Коршиков Р.Ю., Терлич С.В. Застосування інформаційних технологій в забезпеченні міцності і вібрації суден та їх конструкцій. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2018. Вип. 37. Серія: «Технічні науки». С. 120–128.
9. Лугінін О.Є., Терлич С.В., Коршиков Р.Ю. До розрахунку міцності днищових перекриттів з урахуванням особливостей при спусканні та постановці судна в док. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, 24–25 вересня 2020 р. Миколаїв : НУК, 2020. С. 39–44.
10. Коростильов Л.І., Щедролюсєв О.В. Міцність суднового корпусу і його елементів при побудові, спуску та документуванні : навчальний посібник. Миколаїв : НУК, 2020. 68 с.

REFERENCES

1. РД 5.1033-80. (1980) Descent of ships. Strength of hulls and triggers [Spusk sudov. Prochnost' korpusov i spuskovykh ustroystv] Moscow: Publishing house of standards 165 p [In Russian].

2. ПД 5-076.011-82. Methodical instructions. Strength calculation methods. Computer calculation of the general and local strength of ships and vessels when placed in dry and floating docks (1982) [Metodicheskiye ukazaniya. Metody raschota prochnosti. Raschot na EVM obshchey i mestnoy prochnosti korably i sudov pri postanovke v sukhoy i plavuchiy doki] Leningrad: Shipbuilding. 237 p. [In Russian].
3. Kozlyakov V.V., Finkel G.N. & Kharkhurim I.Ya. (1973) Design of dock support devices. Tutorial. [Proyektirovaniye dokovykh opornykh ustroystv. Uchebnoye posobiye] Leningrad: Shipbuilding. 176 p. [In Russian].
4. Antonenko S.V. (2008) Ensuring the strength, stability and unsinkability of ships during repair [Obespecheniye prochnosti, ostoychivosti i nepotplyayemosti sudov pri remonte] Vladivostok: Far-East PI. 231 p. [In Russian].
5. Serdyuchenko A.M., Luginin O.Y., Korshikov R.Yu. & others (2012) Fundamentals of strength theory, structural mechanics, strength and vibration of ships. Tutorial [Osnovy teoriiy pruzhnosti, budivel'noyi mekhaniky, mitsnosti ta vibratsiyi suden. Navchal'nyy posibnyk] Nikolaev: NuOS Publishing. 424 p. [In Ukrainian].
6. Paliy O.M. (1982) Handbook of ship building mechanics. In 3. volumes. Leningrad: Shipbuilding. 376 p. [In Russian].
7. Luginin O.Ye. & Filatova N.A. (2018) Universalization of the use of the five-point method in the calculation of the bending of ship's floors on the PC. Proceedings of Ukrainian scientific and technical conference with international participation "Modern technologies for the design, construction, operation and repair of ships, marine equipment and engineering structures" (May 20–21, 2018) [Universalizatsiya vykorystannya metodu p'yaty momentiv v rozrakhunkakh z'hynu sudnovykh perekryttiv na PK. Materialy vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi z mizhnarodnoyu uchastyu «Suchasni tekhnolohiyi proektuvannya, pobudovy, ekspluatatsiyi ta remontu suden, mors'kykh tekhnichnykh zasobiv i inzhenernykh sporud» (20–21 travnya 2018 r.)]. Nikolaev: Publishing «Torubara V.V.». P. 114–116 [In Ukrainian].
8. Luginin O.Ye., Korshykov R.Yu. & Terlych S.V. (2018) The use of information technology in ensuring the strength and vibration of ships and their structures. Bulletin of the Azov State Technical University: Collection of scientific works. #. 37. Series: "Technical Sciences" [Zastosuvannya informatsiynykh tekhnolohiy v zabezpechenni mitsnosti i vibratsiyi suden ta yikh konstruksiy. Visnyk Pryazovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: Zbirnyk naukovykh prats'. Vyp. 37. Seriya: «Tekhnichni nauky».] Mariupol: «AzovSTU». P. 120–128 [In Ukrainian].
9. Luginin O.Ye., Terlych S.V. & Korshykov R.Yu. (2020) To calculate the strength of the bottom floors, taking into account the peculiarities of the descent and placement of the vessel in the dock. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering" (September 24–25, 2020) [Do

rozrakhunku mitsnosti dnyshchovykh perekryttiv z urakhuvannyam osoblyvostey pry spuskanni ta postanovtsi sudna v dok. Materialy KHI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi «Innovatsiyi v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» (24–25 veresnya 2020 r.)] Nikolaev: NuOS. P. 39–44 [In Ukrainian].

10. Korostyl'ov L.I., Shedrolosiev O.V. (2020) The strength of the ship's hull and its elements in the construction, descent and docking: Textbook [Mitsnist' sudnovoho korpusu i yoho elementiv pry pobudovi, spusku ta dokuvanni: Navchal'nyy posibnyk] Nikolaev: NuOS. 68 p. [In Ukrainian].