

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова

Навчально науковий інститут (факультет) Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Л.І. Коростильов

« 26 » 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: Дослідження експлуатаційних напружень
у конструкціях траулера

Виконав: студент 6118мх групи

Павперова Т. О.
(підпис)

Керівник роботи:

ст. викл. каф. БМ та ККК, к.т.н.

Литвиненко Д. Ю.
(посада, науковий ступень вчене звання)

Миколаїв – 2024 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально науковий інститут (факультет) Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

Спеціальність 135 Суднобудування

Освітньо-професійна програма Суднокорпусобудування

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми



к.т.н., Литвиненко Д. Ю.

«26» 12 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Павперова Тетяна Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження експлуатаційних напружень у конструкціях траулера»

«Research of operational stresses in structures of the fishing trawler»

Керівник роботи Литвиненко Д. Ю., к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора вищого навчального закладу від

«20» 11 2024 року № 1357-42

2. Строк подання студентом роботи 26.12.2024

3. Вихідні дані до роботи

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів):

1. Загальний опис проблеми

2. Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна-траулера

3. Основні положення методу скінченних елементів

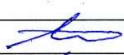
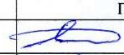
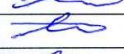
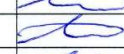
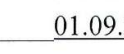
4. Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі

5. Перелік презентаційних матеріалів:

5.1 Презентація магістерської роботи

5.2

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	ПіБ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Литвиненко Д. Ю.		
2	Литвиненко Д. Ю.		
3	Литвиненко Д. Ю.		
4	Литвиненко Д. Ю.		
5	Литвиненко Д. Ю.		

7. Дата видачі завдання 01.09.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Загальний опис проблеми	20.09.2024	
2	Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна-траулера	10.10.2024	
3	Основні положення методу скінченних елементів	10.11.2024	
4	Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі	01.12.2024	

Студент


(підпис)

Павперова Т. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Литвиненко Д. Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Павперова Т.О. «Дослідження експлуатаційних напружень у конструкціях траулера». Кваліфікаційна робота зі спеціальності 135 «Суднобудування», освітньої програми «Суднокорпусобудування». Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. 2024 рік.

Встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції судна-траулера при експлуатаційному навантаженні відповідно до норм міцності морських суден. Встановлено величини розмахів сумарних номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень в «горячій точці» для різних варіантів конструкції бортового перекриття, отримані з врахуванням впливу корозійного зносу.

Ключові слова: скінченно-елементний аналіз, еквівалентні напруження, експлуатаційні навантаження, суднокорпусний вузол

ANNOTATION

Pavperova T.O. “Research of operational stresses in structures of the fishing trawler”. Qualification work in the specialty 135 “Shipbuilding”, educational program ‘Shipbuilding’. Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 2024.

The magnitudes of local loads on the hull structures of a trawler vessel under operational loading in accordance with the strength standards for seagoing vessels were determined. The magnitudes of the total nominal equivalent operational stresses in the “hot spot” for different variants of the side structure were determined, taking into account the influence of corrosion wear.

Keywords: finite element analysis, equivalent stresses, operational loads, ship's hull assembly

ЗМІСТ

ВСТУП

1. Загальний опис проблеми

1.1. Загальний опис траулерів

1.2. Опис проблеми визначення експлуатаційних напружень

1.3. Висновки із розділу 1

2. Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна

2.1. Вихідні дані для розрахунків

2.2. Визначення розмахів хвильових тисків, що діють на корпус судна

2.3. Результати розрахунків розмахів хвильових тисків

2.4. Висновки із розділу 2

3. Основні положення методу скінченних елементів

3.1. Короткі теоретичні відомості із методу скінченних елементів

3.2. Висновки із розділу 3

4. Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі

4.1. Визначення розмахів діючих номінальних напружень, що діють на вузол перетину подвійного дна та шпангоуту з використанням плоских стержньових моделей суднокорпусних конструкцій

4.2. Визначення розмахів діючих номінальних напружень, що діють на вузол перетину подвійного дна та шпангоуту з використанням 3-вимірних стержньових моделей суднокорпусних конструкцій

4.3. Висновки з розділу 4

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність досліджень. Будівництво великих морозильних траулерів (БМРТ) на вітчизняних суднобудівних заводах України має давню історію. На початку довжини таких траулерів не перевищували 100 м, однак підвищення ефективності їхньої експлуатації, використання більш сучасного рибпромислового обладнання призвело до зростання їхніх розмірів і відповідної зміни рівнів навантаження у вузлах носової частини корпусу. Судна проєкту 1288 з розмірами 106,9х16х10,2 нині функціонують у різних країнах світу. Експлуатація траулерів із модернізованими корпусами показала, що в конструктивних вузлах з'єднання основних шпангоутів із подвійним дном за кілька років виникають тріщини втоми, які необхідно усувати під час чергових ремонтів.

Очевидно, що під час розроблення та модернізації проєкту 1288 перевірку втомної міцності відповідних вузлів не виконувалася. Крім того, враховуючи, що наразі судна цього проєкту експлуатуються в різних районах Світового океану, змінилися умови інтенсивності хвильового навантаження на конструкції таких суден. Тому є доцільним дослідити експлуатаційні еквівалентні напруження у корпусах таких траулерів. При цьому доцільно розглянути усі конструктивні варіанти виконання конструкцій борту.

Мета роботи – дослідити експлуатаційні еквівалентні напруження у корпусних конструкціях траулера.

Завдання роботи:

1. Визначити розмахи зовнішніх навантажень на корпус судна в досліджуваних районах із експлуатаційною забезпеченістю за нормативними документами.
2. Розробити комп'ютерні моделі досліджуваних конструкцій для визначення експлуатаційних напружень методом скінченних елементів.

3. Визначити еквівалентні експлуатаційні напруження для всіх варіантів виконання конструкцій борту.

Об'єктом дослідження є явище змінних напружень у суднокорпусних конструкціях.

Предметом дослідження експлуатаційні напруження у суднокорпусних вузлах.

					19.МР.135.6118мх.01.ПЗ.01				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Загальний опис проблеми			Арк.	
Студент	Павлєрова Т. О.								
Керівник	Литвиненко Д. Ю.								
Зав. каф.	Коростильов Л. І.					НУК			

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНИЙ ОПИС ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальний опис траулерів

Траулер - промислове судно, призначене для добування водних біоресурсів за допомогою трала. Нерідко траулери оснащуються холодильними установками для заморожування і збереження продукції, а іноді й обладнанням для переробки риби в напівфабрикати. Від сейнера траулери, як правило, відрізняються більшою потужністю, що дає змогу здійснювати тралення - тобто протягування трала крізь товщу води.

В роботі досліджувались напруження у конструкція траулера проекту 1288 типу “Пулковський меридіан”. Такі траулери були побудовані в Україні у значній кількості і наразі експлуатуються у різних частинах світу.

Великий автономний морозильний траулер проекту 1288 типу «Пулковський меридіан» - великотоннажне рибпромислове судно (траулер), призначене для промислу риби, а також самостійного оброблення, заморожування та зберігання улову, виробництва з нього готової продукції у вигляді консервів, вироблення технічного і медичного жиру, перероблення виробничих відходів та прилову на борошно. Основні об'єкти промислу траулера - минтай і тріска, оселедець, хек, скумбрія, ставрида, сардина, морський окунь та інші види риб.

Будівництво траулера тривало в період із 1974 до 1993 року на Чорноморському суднобудівному заводі в Миколаєві. Всього було побудовано 113 суден цього проекту. Комп'ютерна модель такого траулера представлена на рис. 1.1, а схема на рис. 1.2.



Рис. 1.1. 3-вимірна модель траулера проекту 1288

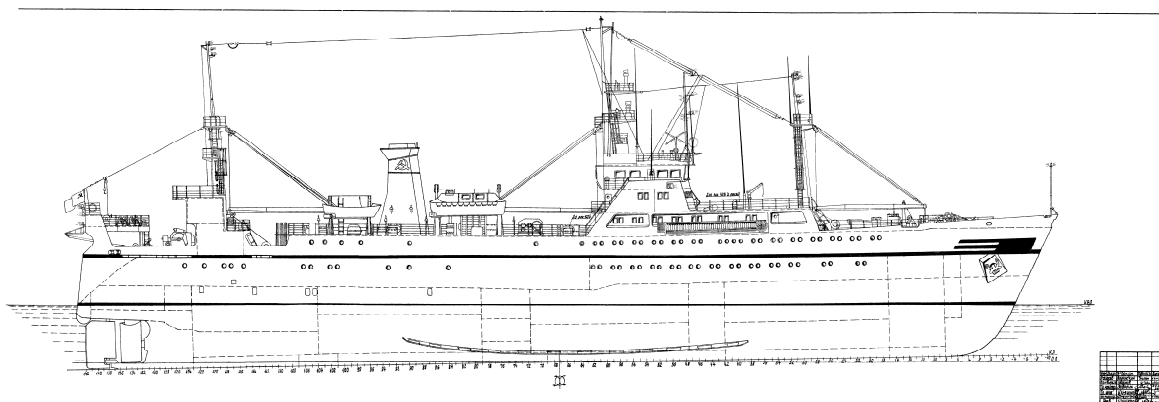


Рис. 1.2. Схема траулера проекту 1288

Судно проекту 1288 є двопалубним одногвинтовим теплоходом з надлишковим надводним бортом, подовженим баком, зі зміщеним у корму машинним відділенням. Судно має розвинену надбудову, зміщену в ніс, відкриту промислову палубу, завдовжки 43 м і завширшки 9 м, кормовий сліп для спуску знарядь лову. Для зберігання улову траулер має два рефрижераторних вантажних трюми з твіндеками, сумарною місткістю 2140 кубометрів і підтримуваною температурою до -28°C . Також є трюми для зберігання рибного борошна і консервів, цистерни технічного і медичного жиру.

Траулер має такі технічні характеристики (у дужках дані стосовно головного судна) :

- Довжина найбільша - 104,50 (103,1) м;
- Довжина між перпендикулярами - 96,40 (94,0) м;
- Ширина - 16,00 м;
- Висота борту до ВП - 10,20 м;
- Осадка у вантажу - 5,90 (5,80) м;
- Водотоннажність максимальна - 5720 (5600) т;
- Дедвейт максимальний - 1810 (1980) т;
- Вантажопідйомність - 1364 т;
- Вантажомісткість
- загальна вантажомісткість - 2595 м³;
- морозильного трюму № 1 - 960 м³;
- морозильного трюму № 2 - 1180 куб.м.;
- трюму рибного борошна - 370 куб.м.;
- цистерни медичного жиру - 10 м³;
- цистерни технічного жиру - 25 м³;
- Валова/чиста місткість - 4407/1322 рт. ст.;
- Швидкість ходу у вантажу/максимальна - 14,3/16,1 вуз;
- Тягове зусилля при траленні на 6 вузлах - 25,5 тс;
- Запаси:
- палива - 1150 т;
- мастила - 56 т;
- прісної води - 103 т;
- Автономність плавання по паливу/провізії - 58/70 діб;
- Екіпаж - 93 особи.

Проблемою траулерів цієї серії є зародження тріщин втомі у вузлі з'єднання шпангоуту із днищем, як показано на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Тріщина втоми у вузлі

Причиною зародження тріщини є надмірні експлуатаційні напруження у вузла та високий рівень концентрації напружень.

В цій роботі досліджувались еквівалентні експлуатаційні напруження в трьох варіантах конструкцій борту траулера: вихідного варіанту конструкції; модернізованого варіанту конструкції борту з подовженими до другого дна проміжними шпангоутами; варіант з подовженими проміжними шпангоутами та одним посиленням бортовим стрингером.

1.2 Опис проблеми визначення експлуатаційних напружень

На конструкції суден за термін їх експлуатації діють одночасно навантаження від загального повздовжнього згину та місцеві навантаження. Перші обумовлюють дію у поздовжніх в'язях еквівалентного поперечного перерізу корпусу нормальних напружень, знак яких змінюється поперечно при переході з підовшви на вершину хвилі. Місцеві навантаження обумовлюють згин перекриттів, балок та пластин.

Таким чином, розрахункове напруження, на базі якого виконується розрахунки на втому, повинні враховувати усі складові напружень, що діють на конструктивний вузол. Розмах таких еквівалентних номінальних напружень, згідно [6], визначається за формулою

$$\sigma_p^\Sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^3 \sigma_j^2 + 2 \sum_{j=1}^3 \sum_{v=1}^3 \rho_{jv} \sigma_j \sigma_v}, \quad (1.1)$$

де σ_j – складові розмахів змінних напружень; $\rho_{jv} \approx \pm 0,5$ – коефіцієнти кореляції складових напружень, що розглядаються.

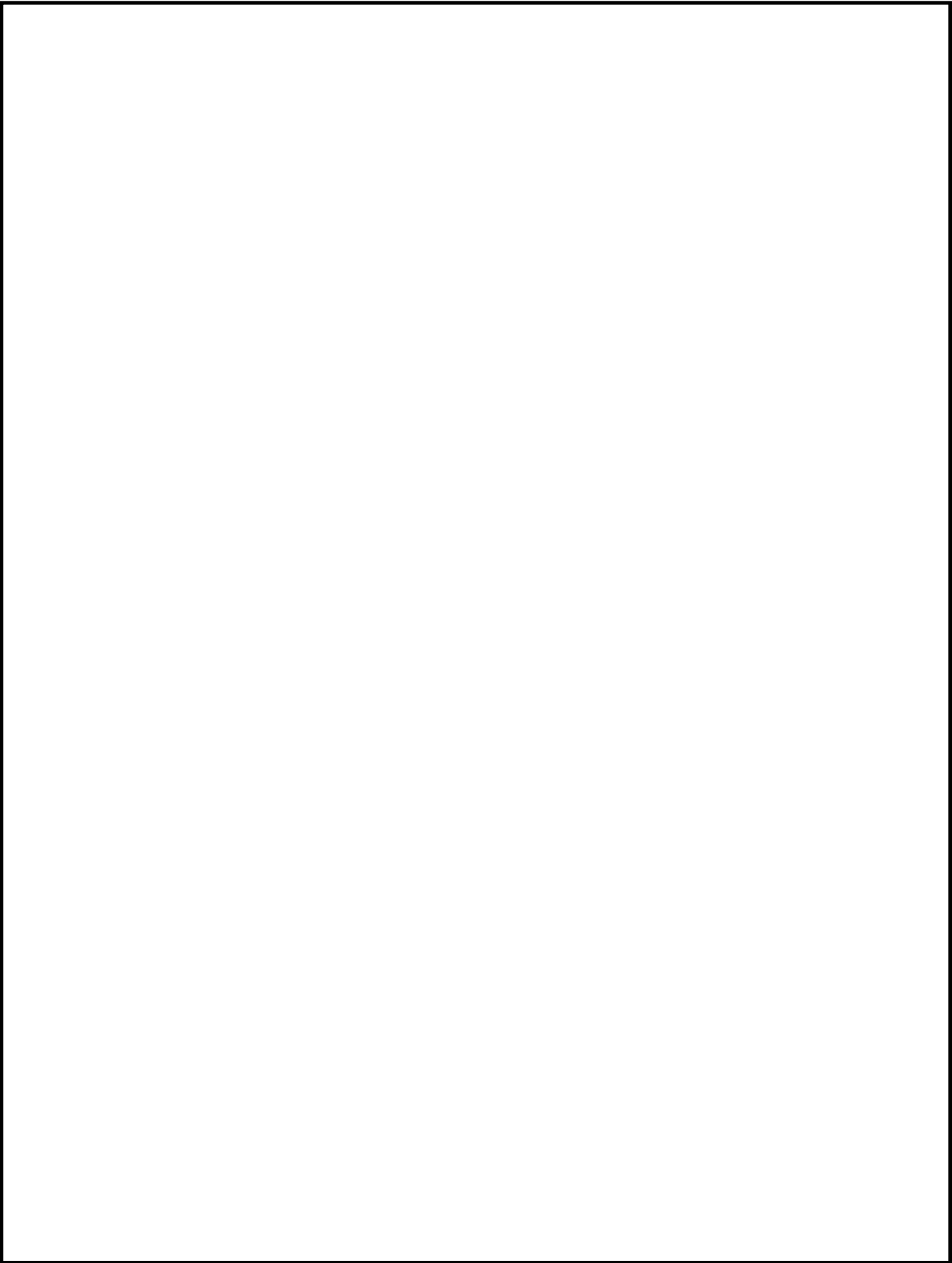
Величини складових напружень від загального повздовжнього згину судна у вертикальній площині σ_1 , від згину перекриття σ_2 та згину балки σ_3 при використанні балкової моделі відсіку визначаються за формулою

$$\sigma_i = \frac{M_{z,п,б} z}{I}, \quad (2.2)$$

де M_z , $M_{п}$, M_b – величини розмахів згинальних моментів, Н·м, від загального повздовжнього згину корпусу судна, згину перекриття та балки, відповідно; I – момент інерції площі поперечного перерізу еквівалентного бруса або балки, м⁴; z – відстань від нейтральної вісі балки до точки, що розглядається, м.

Висновки із розділу 1

1. Виконоано огляд проблеми появи втомних тріщин у конструкціях траулера через дію підвищених навантажень у них.
2. Виконано огляд проблеми визначення змінних експлуатаційних напружень у констурктивних вузлах корпусів суден.



					19.МР.135.6118м.03.ПЗ.03			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Студент	Павперова Т. О.				Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна	Літ.	Арк.	Акрушів
Керівник	Литвиненко Д. Ю.							
Зав. каф.	Коростильов Л. І.					НУК		

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМАХІВ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОРПУС СУДНА

2.1 Вихідні дані для розрахунків

- Довжина між перпендикулярами $L_{pp} = 106,9$ м
- Специфікаційна швидкість на тихій воді $v_0 = 12$ вузлів.
- Коефіцієнт загальної повноти $C_b = 0,616$
- Відстань розглянутого поперечного перерізу (29 шп. або середина відсіку) від найближчого носового перпендикуляра $x_1 = 22,1$ м
- Відстань розглянутого поперечного перерізу від кормового перпендикуляра $x_2 = 84,8$ м
- Висота борту $D = 10,2$ м
- Ширина судна $B = 16$ м
- Ширина судна в поперечному перерізі корпусу в районі 29 шп. $B_{29} = 11,454$ м
- Прискорення зведеного падіння $g = 9,81$ м/с²

Розрахунковий стан «судно в повному вантажу»

- Осадка носом для РС «судно у вантажі» $d_n = 5,13$ м
- Осадка кормою для РС «судно в баласті» $d_k = 6,61$ м
- Осадка в районі 29 шп. $d_{x29} = 5,436$ м
- Осадка на мідель-шпангоуті $d_m = 5,87$ м
- Масова щільність вантажу (заморожена риба) $\rho_r = 1,015$ т/м³
- Висота трюму (прийнято із запасом у бік завищення) $h_{тр} = 7,894$ м
- Висота укладання вантажу в трюмі $h_{гтр} = 7,5$ м
- Кут нахилу стінки до горизонту $\alpha = \pi/2$
- Кут внутрішнього тертя навалочного вантажу $\varphi = \pi/4$

- Відстані по вертикалі точки прикладання навантаження від рівня вільної поверхні вантажу в трюмі (прийнято із запасом у бік завищення) $z_j = h_{гтр}$

Розрахунковий стан «судно в баласті»

- Осадка носом для РС «судно у вантажі» $d_n = 2,16$ м
- Осадка кормою для РС «судно в баласті» $d_k = 6,33$ м
- Осадка в районі 29 шп. $d_{x29} = 3,022$ м
- Осадка на мідель-шпангоуті $d_m = 4,245$ м

2.2 Визначення розмахів хвильових тисків, що діють на корпус судна

Змінні навантаження, що діють на корпус, визначаються згідно з нормами міцності морських суден. Мінімальне число розглянутих розрахункових станів 2 - «судно в повному вантажу» і «судно в баласті».

2.2.1 Розмахи хвильових тисків для точок прикладання навантажень вище розрахункової ватерлінії

Розмахи хвильових тисків для точок докладання навантажень, розташованих вище розрахункової ватерлінії, визначають за формулою

$$p_w = p_{w0} - 8\xi, \quad (2.1)$$

где ξ – відстань від розрахункової ватерлінії (абсолютна величина), м.

Розрахунковий тиск на рівні розрахункової ватерлінії

$$p_{w0} = h_i k_x k_p, \quad (2.2)$$

где h_i – висота розрахункової хвилі із забезпеченістю 10^{-3} для розрахунку розмахів хвильових тисків, м; k_x , k_p – коефіцієнти.

Коефіцієнт розподілу тиску по довжині судна k_x для поперечних перерізів у ніс від міделя визначається за формулою

$$k_x = \frac{1,2(1 + 0,25v_0 / \sqrt{L_{pp}})}{C_b} (1 - 2,5x_1 / \sqrt{L_{pp}}) \geq 1, \quad (2.3)$$

де x_1 - відстань розглянутого поперечного перерізу від найближчого носового перпендикуляра, м; C_b - коефіцієнт загальної повноти ($C_b \geq 0,65$); L_{pp} - довжина між перпендикулярами, м; v_0 - специфікаційна швидкість на тихій воді, вузл.

Коефіцієнт

$$k_p = (5,5 + 0,5L_{pp}/100)k_ck_n, \quad (2.4)$$

де $k_c = (0,65/C_b)^{1/3} \leq 1$; $k_n = 1$ при визначенні розмахів експлуатаційних тисків.

Висота розрахункової хвилі із забезпеченістю 10^{-3} , м

$$h_2 = 5,5 - 0,5 \left(\frac{275 - L_{pp}}{100} \right)^{1,5}. \quad (2.5)$$

2.2.2 Розмахи хвильових тисків для точок прикладання навантажень нижче розрахункової ватерлінії

$$p_w = p_{w0}f_p, \quad (2.6.)$$

де величина p_{w0} розраховується відповідно до (2.2); f_p на відстані $\xi \leq \xi_{max}$ від розрахункової ватерлінії визначається за формулою

$$f_p = 1 + 0,85\xi/\xi_{max}, \quad (2.7)$$

у якій $\xi_{max} = 0,1p_{w0}$.

На відстані $\xi_{max} \leq \xi \leq dx$ від розрахункової ВЛ f_p можна розрахувати за формулою

$$f_p = 1,85 - (0,85 - f_c) \frac{\bar{\xi} - \bar{\xi}_{max}}{1 - \bar{\xi}_{max}}, \quad (2.8)$$

где $f_c = 2(1 - 4d_x/L_1)$; $\bar{\xi} = \xi/d_x$; $\bar{\xi}_{max} = \xi_{max}/d_x$; $L_1 = L_{pp}(100/L_{pp})^{0,25} \leq L_{pp}$.

Розмах середніх за шириною днища хвильових тисків можна визначити відповідно до залежності (2.1), в якій

$$f_p = 2(1 - 4d_x/L_1) \left\{ 1 - \frac{1}{6} (10B_{29}/L_{pp})^{0,5} \right\}, \quad (2.9)$$

где B_{29} – ширина судна в поперечному перерізі корпусу в районі 29 шп.

2.2.3 Розрахункові експлуатаційні амплітуди хитавиці та прискорень

Розрахункові амплітуди кильової хитавиці визначають за формулою

$$\psi_2 = h_2 \alpha_\psi, \quad (2.10)$$

де $\alpha_\psi = [1,0 + 0,15v_0/\sqrt{L_{pp}}] L_{pp} C_b$.

Розрахункові кути бортової хитавиці, рад, визначаються за формулою

$$\Theta_2 = h_2 \frac{3,25(100/L_{pp})^{1/3}}{B + 50} (1,40 - 0,15B/d_m) [1 - 4,5(C_b - 0,7)^2], \quad (2.11)$$

де B – ширина судна, м; d_m – осадка на мідель-шпангоуті.

Вертикальні прискорення, м/с², розраховуються за наступними формулами:

$$a_{z2} = gh_2 \frac{2(1 + 0,2v_0/\sqrt{L_{pp}})}{L_{pp} C_b^{0,5}} \sqrt{1 + k_z}, \quad (2.12)$$

де

$$k_z = \frac{7(1 + 0,15v_0/\sqrt{L_{pp}})}{C_b} (x_2/L_{pp} - 0,42)^2,$$

x_2 – відстань поперечного перерізу, що розглядається, від кормового перпендикуляру, м; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Повздовжні прискорення, м/с², розраховують за наступною формулою:

$$a_{x2} = gh_2 \frac{0,8C_b^{0,5} \left(1 + 0,2v_0 / \sqrt{L_{pp}}\right)}{L_{pp}}. \quad (2.13)$$

Поперечні прискорення, м/с², розраховують за наступною формулою:

$$a_{y2} = gh_2 \frac{1,3 \left(1 + 0,2v_0 / \sqrt{L_{pp}}\right)}{L_{pp} C_b^{0,5}} \sqrt{1 + 3,5 \left(x_2 / L_{pp} - 0,42\right)^2}. \quad (2.14)$$

В залежностях (2.10)–(2.14) при $C_b \leq 0,65$, приймають $C_b = 0,65$, а при $L_{pp} \leq 100$ м приймають $L_{pp} = L_1$.

2.2.4 Розрахункові тиски на конструкції, що обмежують трюми для навалювального вантажу

Розмах тисків, кПа, на друге дно визначається за формулою

$$p_{\Gamma R} = 2\rho_{\Gamma} h_{\Gamma} a_{z2}, \quad (2.15)$$

де ρ_{Γ} – щільність вантажу; h_{Γ} – висота укладання вантажу у трюмі.

Розмах внутрішніх тисків, кПа, на стінки, що обмежують трюм для навалочного вантажу

$$p_{\Gamma R_{ВН}} = 2\rho_{\Gamma} h_{\Gamma} a_{z2} z_j, \quad (2.16)$$

где z_j – відстань по вертикалі точки прикладання навантаження від рівня вільної поверхні вантажу в трюмі, м;

$$k_{\Gamma} = \sin^2 \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45^{\circ} - \frac{1}{2} \varphi \right) + \cos^2 \alpha$$

α – кут нахилу стінки до горизонту, рад; φ – кут внутрішнього тертя навалочного вантажу, рад.

2.2.5 Розмахи сумарних тисків на конструкції днища і борту

Розмах осереднених сумарних тисків на днище визначається згідно із залежністю

$$p_{\text{д}}^{\Sigma} = \sqrt{(p_{\text{гR}})^2 + (p_{\text{вдоср}})^2 + (p_{\text{гR}})(p_{\text{вдодос}})}, \quad (2.17)$$

де $p_{\text{вдоср}}$ – величина усереднених по ширині днища хвильових тисків.

Розмахи сумарних експлуатаційних тисків на бортові перекриття, з урахуванням протитиску сипучого вантажу

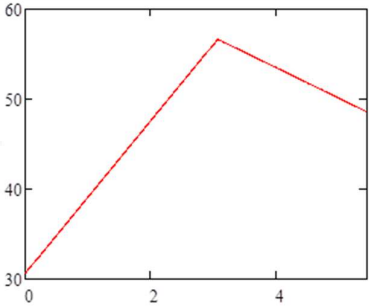
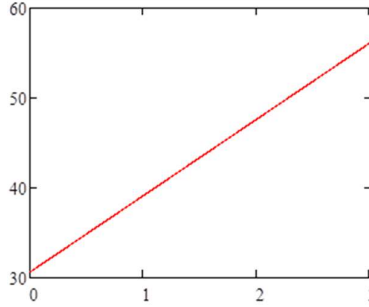
$$p_{\text{б}}^{\Sigma} = \sqrt{p_{\text{б}}^2 + p_{\text{в}}^2}, \quad (2.18)$$

де $p_{\text{б}} = \rho_{\text{г}} g \sqrt{(B_{29} \theta_2)^2 + \left((2a_{z2}/g) z_j k_{\text{г}} \right)^2}$, в якому B_{29} – ширина судна в поперечному перерізі корпусу в районі 29 шп.

2.3 Результати розрахунків розмахів хвильових тисків

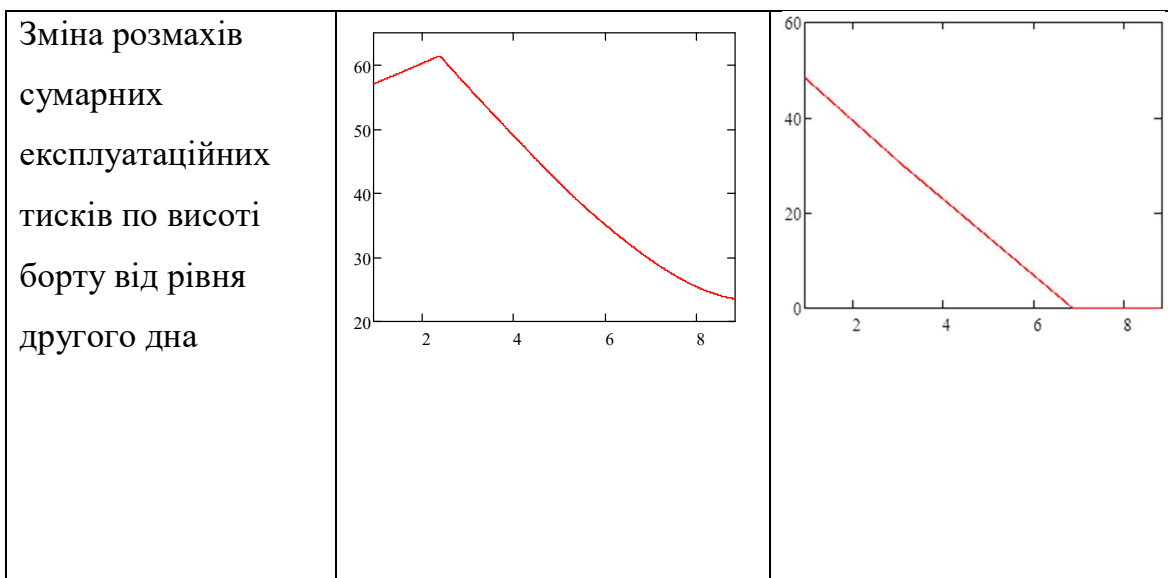
Результати розрахунків розмахів хвильових тисків за формулами, наведеними в 2.2, для «судна в повному вантажу» і «судна в баласті» наведено в таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1 – Результати розрахунків розмахів хвильових тисків для «судна в повному вантажі» і «судна в баласті»

	«Судно в повному вантажі»	«Судно в баласті»
Висота розрахункової хвилі h_2 , м	4,41	4,41
Коефіцієнт k_x	1,151	1,151
Коефіцієнт k_p	6,034	6,034
Розмах розрахункового тиску на рівні розрахункової ВЛ p_{w0} , кПа	30,627	30,627
Розмахи хвильових тисків на борт вище розрахункової ВЛ $p_w(\xi)$, кПа	$30,627 - 8\xi$	$30,627 - 8\xi$
Розмах розрахункових хвильових тисків на рівні 2 дна, кПа	51,753	48,402
Графік зміни розмахів хвильових тисків від розрахункової ВЛ до рівня днища		

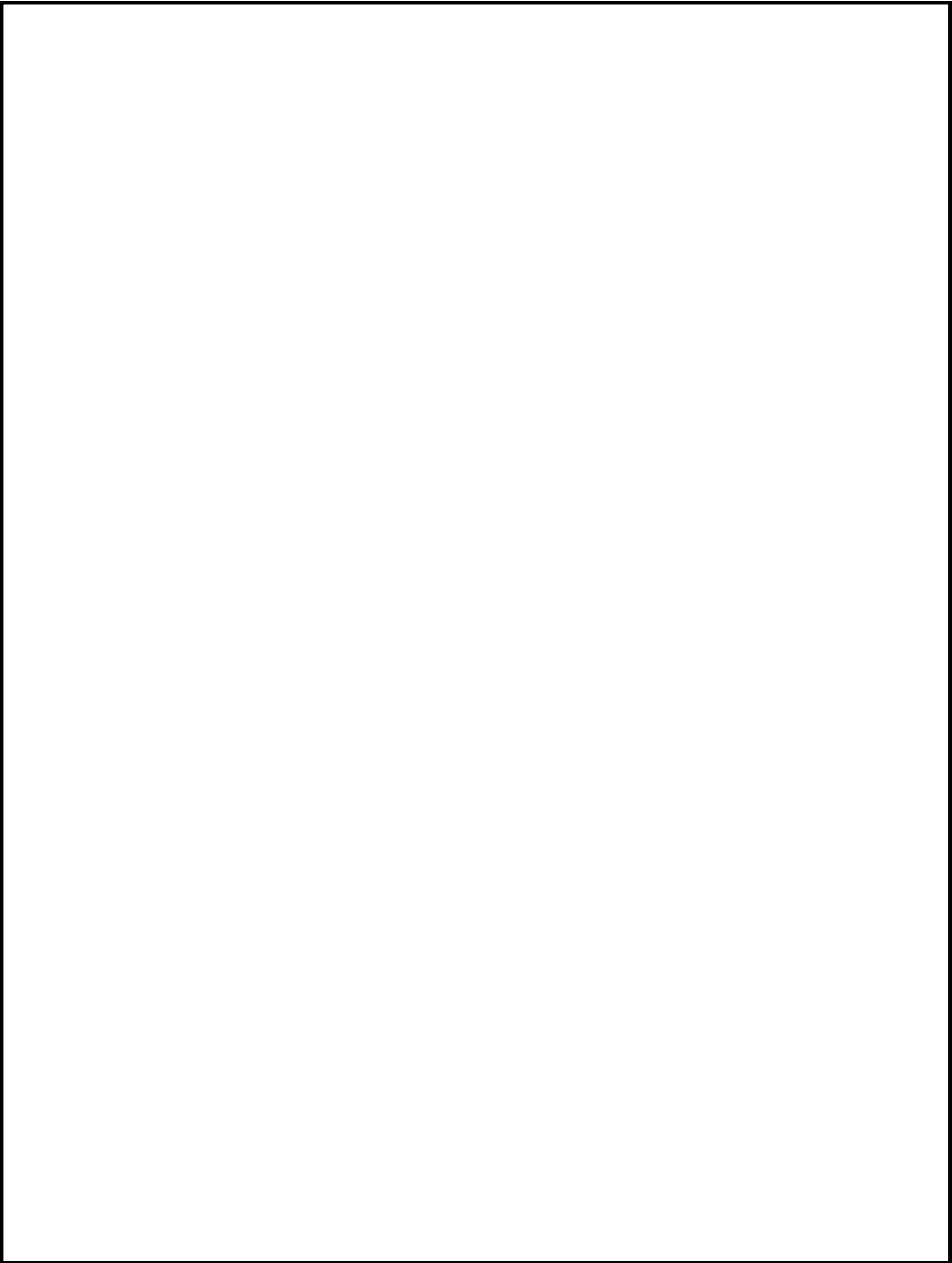
Продовження табл. 2.3.1

Величина осереднених по ширині днища хвильових тисків $p_{\text{вдоср}}$, кПа	40,133	44,781
Вертикальні прискорення a_{z2} , м/с ²	2,056	2,056
Розмах тисків від навалочного вантажу, кПа, на друге дно	31,299	0
Розмах сумарних осереднених тисків на днище, кПа	62,02	44,781
Розахи сумарних експлуатаційних тисків на бортові перекриття в районі другого дна, кПа	57,015	48,402



Висновки із розділу 2

Встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції судна-траулера при експлуатаційному навантаженні відповідно до норм міцності морських суден.



					19.МР.135.6118мх.03.ПЗ.03			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Основні положення методу скінченних елементів	Літ.	Арк.	Акрушів
Студент		Павперова Т. О.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 3

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Короткі теоретичні відомості із методу скінченних елементів

Метод скінченних елементів (МСЕ) виник в 50-х роках XX століття. На сьогоднішній день це один із основних чисельних методів розрахунку міцності конструкцій при дії статичних та динамічних навантажень.

МСЕ базується на розгляді конструкцій у вигляді сукупності окремих конструктивних елементів, з'єднаних у кінцевому числі вузлових точок. Наявність ЕОМ та програмних комплексів (ПК) дає можливість автоматизувати розрахунковий процес, інженер має описати ідеалізовану конструкцію та навантаження. Все необхідне для повного розрахунку є в бібліотеці ПК і приводиться автоматично в дію в потрібній послідовності.

На базі методу скінчених елементів розроблені та продовжують удосконалюватись ряд програмних продуктів, таких як ANSYS, Solidworks Simulation та ін.

Основна ідея методу скінчених елементів полягає в тому, що будь-яку неперервну величину (переміщення, температуру, тиск) можна апроксимувати моделлю, що складається з окремих елементів (ділянок). На кожному з цих елементів досліджувана неперервна величина апроксимується кусково-неперервною функцією, що будується на значеннях досліджуваної неперервної величини в скінченому числі точок елемента, що розглядається.

В загальному випадку неперервна величина наперед невідома та потрібно визначити значення цієї величини в деяких внутрішніх точках області. В більшості випадків при побудові дискретної моделі поступають наступним чином:

1. Область визначення неперервної величини розбивається на скінченне число підобластей, що називаються скінченними елементами. Ці елементи мають спільні вузлові точки та у сукупності апроксимують форму області.
2. В області, що розглядається фіксується скінченне число точок. Ці точки називаються вузовими точками або вузлами.
3. Значення неперервної величини в кожній вузловій точці на початку вважається невідомим, однак необхідно пам'ятати, що ці значення потрібно буде визначити шляхом накладання на них додаткових обмежень в залежності від фізичної суті задачі.
4. Використовуючи значення досліджуваної неперервної величини у вузових точках та апроксимуючу функцію, визначають значення досліджуваної функції всередині області.

Апроксимуючі функції частіше за все вибирають у вигляді лінійних, квадратичних або кубічних поліномів.

Розв'язок задачі з використанням програмного комплексу на базі МСЕ складається з наступних етапів:

1. ідентифікація задачі, присвоєння їй назви, складання розрахункової схеми конструкції та навантажень;
2. розробка геометричної моделі конструкції;
3. розбиття моделі на сітку скінченних елементів;
4. прикладання до моделі граничних умов (закріплення та навантаження на границях);
5. чисельний розв'язок системи рівнянь (автоматично);
6. аналіз результатів.

Етапи 1-4 – препроцесорна стадія; етап 5 – процесорна; 6 – постпроцесорна.

В МСЕ за основні невідомі можуть прийматись величини різного типу: кінематичні (переміщення, деформації), статичні (внутрішні зусилля, напруження та ін.) або змішанні кінематичні і статичні параметри. В залежності від вибору вибору вузлових невідомих розрізняють три форми методу скінченних елементів: метод переміщень, метод сил та змішаний метод.

Метод переміщень – на даний час найбільш розповсюджена форма МСЕ. За цим методом

Таким чином, наприклад, в тривимірних задачах кожен вузол тетрагонального елемента може мати переміщення за трьома напрямками.

Матриця жорсткості $[K]$ пов'язує вектори вузлових переміщень $\{U\}$ та навантажень $\{F\}$. Матриця жорсткості є симетричною діагональною матрицею, що суттєво полегшує її обробку. При складанні рівнянь рівноваги враховується, що сума проекцій усіх сил на кожен з координатних осей дорівнює нулю, а сума внутрішніх сил дорівнює зовнішній силі з протилежним знаком.

Розглянемо основні залежності МСЕ на прикладі “пружинного” елемента (див. рис. 4.6), який здатний сприймати тільки осьове навантаження $f_{1,2}$, тобто розтягання або стискання. Коефіцієнт пропорційності між повздовжньою деформацією елемента та навантаженням позначимо як жорсткість пружини k . Виберемо систему координат елемента як вісь ox , яка орієнтована вздовж довжини елемента.

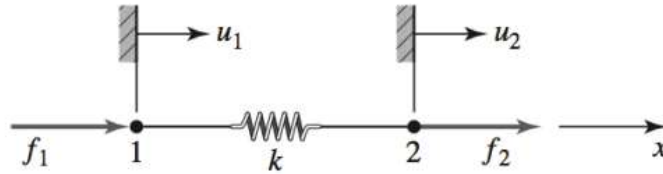


Рис. 3.1. Приклад простішого двовузлового “пружинного” елемента

Передбачаючи, що обидва вузлові переміщення $u_{1,2} = 0$, деформація пружинного елемента визначається як $\delta = u_2 - u_1$. Результуюча осьова сила: $f = k\delta = k(u_2 - u_1)$.

Умова рівноваги: $f_1 + f_2 = 0$ звідки $f_1 = -f_2$.

Таким чином

$$\begin{cases} f_1 = -k(u_2 - u_1) \\ f_2 = k(u_2 - u_1) \end{cases} \quad (4.1)$$

Попередню систему рівнянь можна представити у матричній формі

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

В останньому можна позначити квадратну матрицю як $[k_e]$ – це матриця жорсткості для одного “пружинного” елемента; вектор, що містить величини $u_{1,2}$ позначимо як вектор вузлових переміщень елемента $\{u\}$; вектор, що містить величини $f_{1,2}$ – вектор вузлових зусиль елемента $\{f\}$.

Після заміни відповідних величин у (4.2) отримаємо наступне

$$[k_e]\{u\} = \{f\} \quad (4.3)$$

Запишемо вирішальне рівняння МСЕ для системи з будь-якого числа елементів

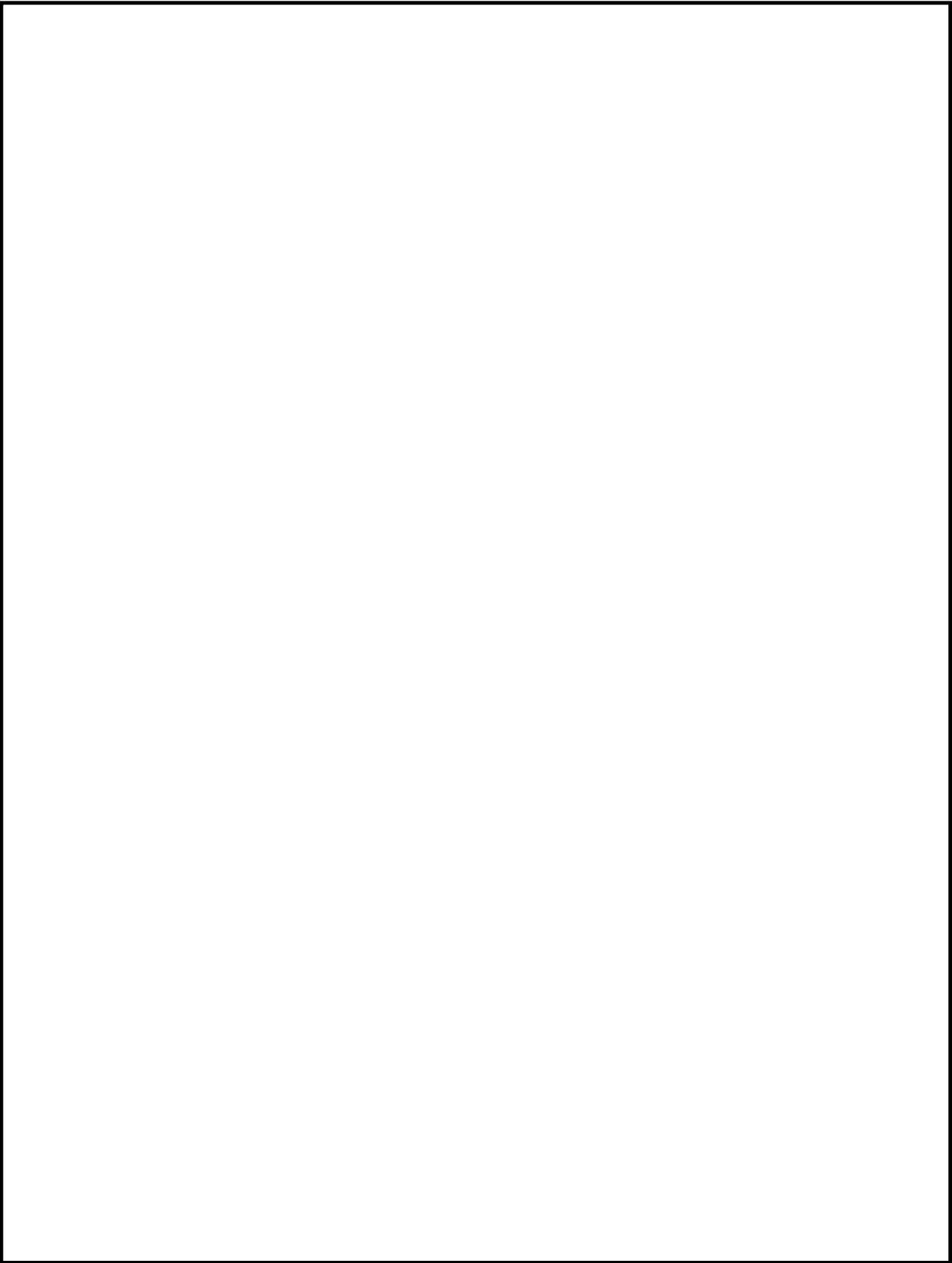
$$\{F\} = [K]\{U\}, \quad (4.4)$$

де $[K]$ – глобальна матриця жорсткості всієї моделі; $\{U\}$ – глобальний вектор вузлових переміщень, який є шуканою величиною; $\{F\}$ – вектор вузлових зусиль всієї моделі.

Розв’язок системи рівнянь (5.5) виконується за допомогою прямих або ітераційних методів. Після знаходження глобального вектору вузлових переміщень $\{U\}$ визначають вектори вузлових переміщень для скінчених елементів $\{u\}$. З використанням останніх та функцій форми обчислюється поле переміщень для будь-якого елемента. На базі визначеного поля переміщень можна визначити поле деформацій та напружень.

3.2 Висновки із розділу 3

- Встановлено, що доцільно застосовувати стержньові елементи для побудови 2-D та 3-D моделей й визначення напружень.
- Наведено основні залежності методу скінчених елементів.



					19.МР.135.6118мх.03.ПЗ.05			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі	Літ.	Арк.	Акрушів
Студент		Вдовиченко М. О.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМАХУ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ У КОНСТРУКТИВНОМУ ВУЗЛІ

4.1 Розрахунок величин розмахів згинальних моментів, обумовлених згином перекриття, для різних варіантів конструкції борту

У вихідній конструкції «гарячими точками» є район з'єднання шпангоуту і конструкцій днища, як показано на рис. 4.1.1-4.1.2.



Рисунок 4.1.1 – Тріщина втоми в місці з'єднання шпангоута і днищевих
конструкцій



Рисунок 4.1.2 – Тріщини втоми в носовому трюмі

Результати розрахунків з використанням МСЕ розподілу розмахів згинальних моментів від вигину перекриття в точці закінчення книці по довжині відсіку для вихідного варіанту конструкції подано в таблиці 4.1.1, Результати для модернізованого варіанту конструкції борту з подовженими до другого дна проміжними шпангоутами подано в таблиці 4.1.2, а для варіанту з подовженими проміжними шпангоутами та одним посиленням бортовим стрингером - у таблиці 4.1.3, РС - «судно у повному вантажі».

Балкова модель відсіку з прикладеними навантаженнями для вихідного варіанта конструкції борту як приклад представлена на рисунку 4.1.1, РС - «судно в повному вантажі».

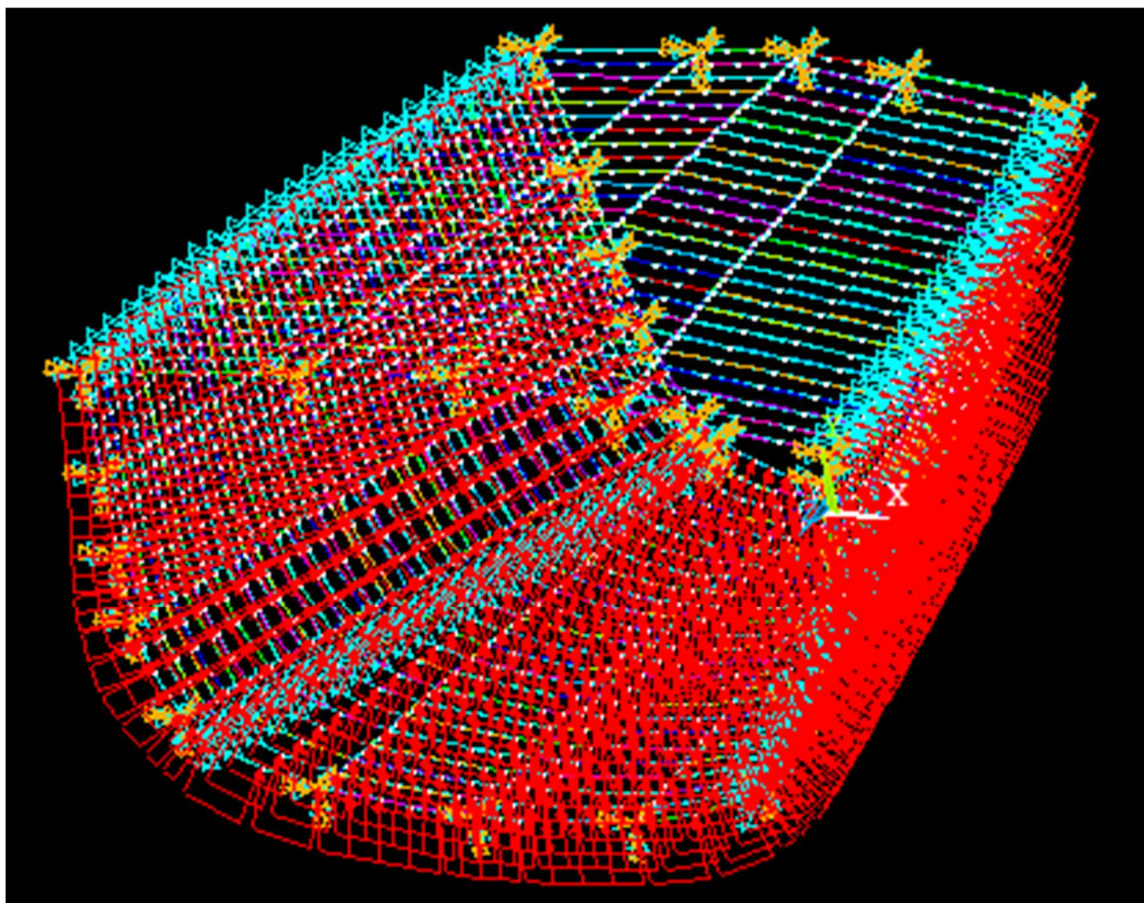


Рисунок 4.1.1 - Балкова модель відсіку з прикладеними навантаженнями для вихідного варіанта конструкції борту

Таблиця 4.1.1 – Розподіл розмахів згинальних моментів у гарячій точці від згину перекриття по довжині відсіку для вихідного варіанту конструкції борту

№ шп,	18	19	20	21	22
M_{II} , Н*мм	0,131E+008	0,266E+008	0,386E+008	0,448E+008	0,443E+008
№ шп,	23	24	25	26	27
M_{II} , Н*мм	0,413E+008	0,507E+008	0,386E+008	0,377E+008	0,358E+008
№ шп,	28	29	30	31	32
M_{II} , Н*мм	0,338E+008	0,320E+008	0,308E+008	0,353E+008	0,195E+007
№ шп,	33	34	35	36	37
M_{II} , Н*мм	0,287E+008	0,311E+008	0,241E+008	0,227E+008	0,210E+008
№ шп,	38	39	40		
M_{II} , Н*мм	0,167E+008	0,105E+008			

Таблиця 4.1.2 – Розподіл розмахів згинальних моментів у «гарячій точці» від згину перекриття по довжині відсіку для варіанта конструкції борту з подовженими до другого дна проміжними шпангоутами

№ шп,	18	19	20	21	22
M_n , H^*_{mm}	0,266E+006	0,192E+008	0,268E+008	0,308E+008	0,317E+008
№ шп,	23	24	25	26	27
M_n , H^*_{mm}	0,308E+008	0,295E+008	0,286E+008	0,271E+008	0,267E+008
№ шп,	28	29	30	31	32
M_n , H^*_{mm}	0,254E+008	0,241E+008	0,230E+008	0,220E+008	0,198E+008
№ шп,	33	34	35	36	37
M_n , H^*_{mm}	0,192E+008	0,200E+008	0,190E+008	0,175E+008	0,169E+008
№ шп,	38	39	40		
M_n , H^*_{mm}	0,159E+008	0,132E+008	0,921E+007		

Таблиця 4.1.3 - Розподіл розмахів згинальних моментів у «гарячій точці» від згину перекриття за довжиною відсіку для варіанта конструкції борту з подовженими до другого дна проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером

№ шп.,	18	19	20	21	22
M_{II} , Н*мм	0,160E+007	0,397E+007	0,815E+007	0,121E+008	0,152E+008
№ шп.,	23	24	25	26	27
M_{II} , Н*мм	0,172E+008	0,187E+008	0,205E+008	0,200E+008	0,198E+008
№ шп.,	28	29	30	31	32
M_{II} , Н*мм	0,192E+008	0,183E+008	0,172E+008	0,160E+008	0,148E+008
№ шп.,	33	34	35	36	37
M_{II} , Н*мм	0,140E+008	0,124E+008	0,109E+008	0,863E+007	0,686E+007
№ шп.,	38	39	40		
M_{II} , Н*мм	0,508E+007	0,300E+007	0,163E+007		

Розрахунок експлуатаційний еквівалентних напружень виконували для перерізів із найбільшим згинальним моментом від вигину перекриття, а також для середини відсіку.

Згинальні моменти від вигину перекриття для РС «судно в баласті» в перерізі, де діють найбільші M_{II} , для РС «судно в повному вантажі» для вихідного варіанту конструкції борту і двох модернізованих варіантів наведено в таблиці 4.1.4.

Для останнього варіанта конструкції борту розрахунок $M_{\text{п}}$ від згину перекриття для РС «судно в баласті» не виконували.

Таблиця 4.1.4 - Величини розмахів згинальних моментів від вигину перекриття для РС «судно в баласті» для всіх варіантів конструкції борту

Варіант конструкції борту	$M_{\text{п}}, \text{Н} \cdot \text{мм}$	
	Найбільший в районі 24-25 шп.	Посередині відсіку в районі 29 шп.
Вихідний	0,179E+008	0,158E+008
Із подовженими проміжними шпангоутами	0,133E+008	0,786E+007
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	—	—

4.2 Розрахунок величин розмахів згинальних моментів, зумовлених згином балки, для різних варіантів конструкції борту

Під час розрахунку величин розмахів згинальних моментів M_6 у «гарячій точці» від згину балки, шпангоут у носовому трюмі розглядали як багатопрогонну балку на пружних опорах, жорстко затиснену в кінцевих точках, розрахункову схему якої наведено на рисунку 4.2.1.

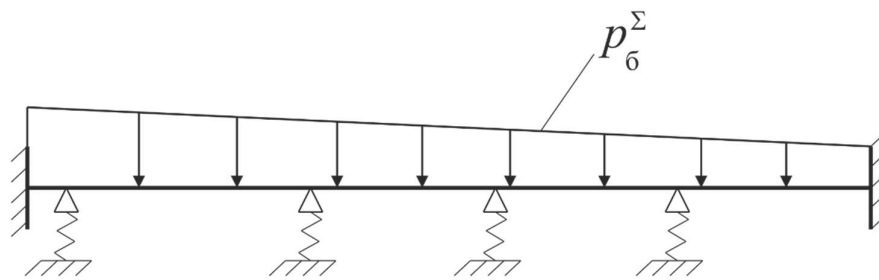


Рисунок 4.2.1 - Розрахункова схема шпангоута в носовому трюмі для вихідного варіанта конструкції бортового перекриття

У випадку вихідного варіанту конструкції борту проміжні шпангоути, які не доходили до другого дна, включалися до складу приєднаного пояска балки. Комп'ютерна модель такої балки, опертої на поздовжні бортові зв'язки, і навантаженої сумарними розмахами експлуатаційних тисків від дії хвиль івантажу для РС «судно в повному вантажі», представлена на рисунку 4.2.2.

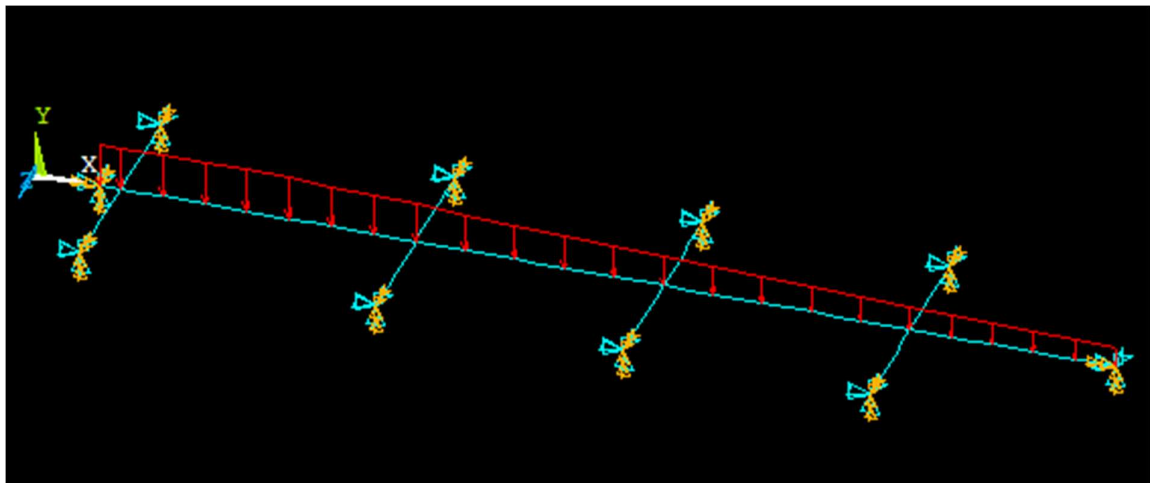


Рисунок 4.2.2 – Комп'ютерна модель шпангоута в носовому трюмі для вихідного варіанта конструкції бортового перекриття

У розрахунковій схемі наявність скулової книці наближено враховували зменшенням довжини балки.

Для другого варіанта конструкції борту, з проміжними шпангоутами, доведеними до другого дна, комп'ютерна модель і розрахункова схема були аналогічними. Відмінність полягала в зменшенні ширини приєднаного пояса і погонного навантаження на балку.

Розрахункова схема і комп'ютерна модель для третього варіанту удосконалення конструкції борту з подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером показані на рисунках 4.2.3 і 4.2.4.

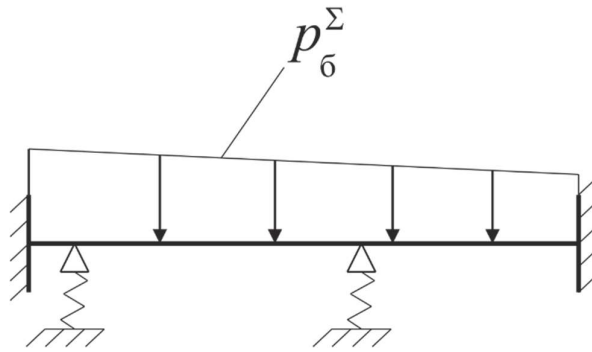


Рисунок 4.2.3 – Розрахункова схема шпангоута в носовому трюмі для модернізованого варіанта конструкції бортового перекриття з подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером

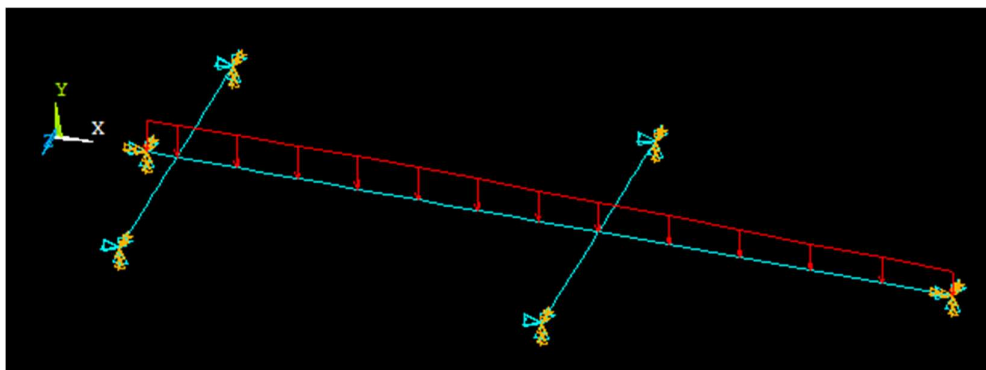


Рисунок 4.2.4 – Комп'ютерна модель шпангоута для модернізованого варіанта конструкції бортового перекриття з подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером

Результати розрахунків розмахів згинальних моментів згину балки M_6 у «гарячій точці» для різних варіантів конструкції борту, розрахункового стану «судно в повному вантажі» і «судно в баласті», подано в таблиці 4.2.1.

Таблиця 4.2.1 - Результати розрахунків згинальних моментів від згину балки в «гарячій точці»

Варіант конструкції борту	M_6 , Н*м	
	РС «судно в повному вантажі»	РС «судно в баласті»
Вихідний	17044	10821
З подовженими проміжними шпангоутами	7665,2	4738,2
З подовженими проміжними шпангоутами та підсиленням бортовим стрингером	7551,3	4738,2

4.3 Розрахунков розмахів номінальних напружень у «горячих точках»

Розрахунок розмахів номінальних напружень виконували згідно з п. 1.2. Наближені схеми поперечних перерізів шпангоутів, що використовували для розрахунку розмахів напружень у разі кожного з конструктивних варіантів борту, наведені на рисунках 4.3.1-4.3.3 відповідно, для вихідного варіанта конструкції борту, для варіанта з подовженими до другого дна проміжними шпангоутами та для варіанта з подовженими проміжними шпангоутами й посиленням бортовим стрингером.

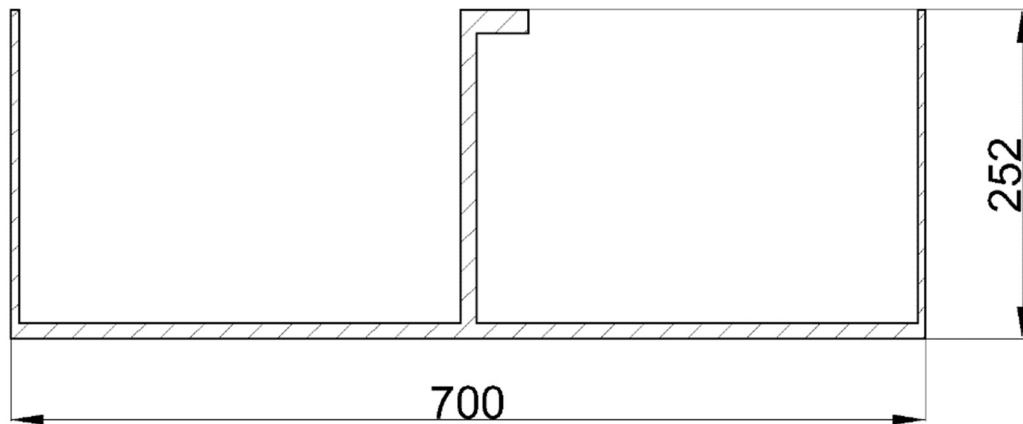


Рисунок 4.3.1 – Наближений переріз профілю шпангоута з приєднаним пояском для вихідного варіанта конструкції борту

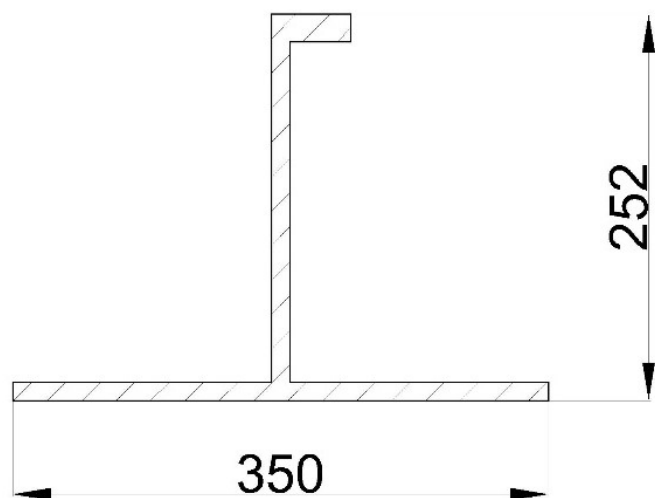


Рисунок 4.3.2 – Наближений переріз профілю шпангоута з приєднаним пояском для варіанта конструкції борту з подовженими проміжними шпангоутами

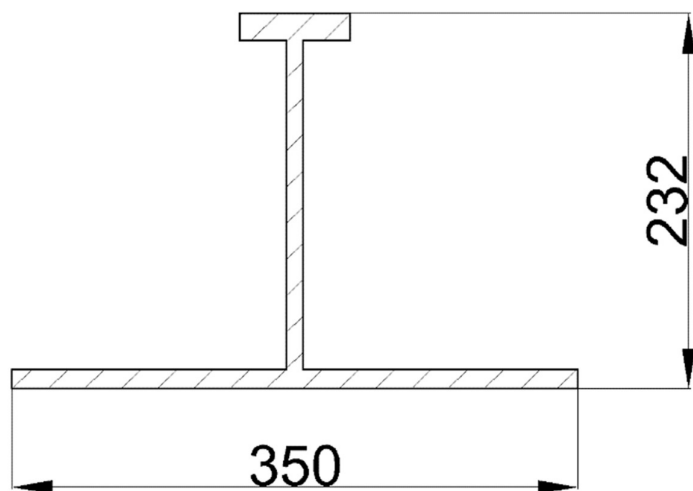


Рисунок 4.3.3 – Наближений переріз профілю шпангоута з приєднаним пояском для варіанта конструкції борту з подовженими проміжними шпангоутами і посиленими бортовим стрингером

Слід зазначити, що під час дослідження напружень у вихідному варіанті конструкції борту і модернізованому з подовженими проміжними

шпангоутами використовували базові креслення проекту 1288, в яких для основних шпангоутів застосовували полособульб несиметричний №24а,

В останньому варіанті модернізації конструкції борту в носовому трюмі з подовженими до другого дна шпангоутами і посиленням бортовим стрингером застосовували штабобульб симетричний НР220х10.

Величини моментів інерції площі перерізів, I , см⁴, показаних на рис. 4.3.1-4.3.3, відносно їхньої нейтральної осі, а також величини віддалення останньої за висотою від зовнішньої крайки бульба, $z_{п}$, см; значення моментів опору площі складових перерізів W , см³, а також величини моментів опору з урахуванням корозійного зношування до кінця розрахункового строку служби судна (25 років), наведені в табл. 3.4.1.

Таблиця 4.2.2 – Характеристики перерізу шпангоутів для трьох конструктивних варіантів борту

Варіанти конструкції борту	I , см ⁴	$z_{п}$, см	W , см ³	W/ω_k , см ³
Вихідний	$1,056 \cdot 10^4$	18,6	567,9	479,1
З подовженими проміжними шпангоутами	$6,357 \cdot 10^3$	17,8	360	303,7
З подовженими проміжними шпангоутами та підсиленням бортовим стрингером	$5,511 \cdot 10^3$	16,2	340,1	287

Величини розмахів номінальних напружень у «гарячій точці» σ_2 і σ_3 , зумовлені згином бортового перекриття і вигином шпангоута у відсіку, розраховані згідно з представленими раніше значень розмахів згинальних моментів представлені в таблиці 4.2.3 і таблиці 4.2.4.

Таблиця 4.2.3 - Величини розмахів номінальних напружень у «гарячій точці» від згину перекриття та згину балки для різних варіантів конструкції бортового перекриття, РС «судно в повному вантажу»

Варіант конструкції борту	Максимальні значення в районі 24-25 шп.		Максимальні значення в районі 29 шп.	
	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
Вихідний	89,16	29,97	56,26	29,97
З подовженими проміжними шпангоутами	79,96	21,42	67,33	21,42
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	60,41	22,22	53,85	22,22

Таблиця 4.2.4 – Величини розмахів номінальних напружень у «гарячій точці» від згину перекриття та згину балки для різних варіантів конструкції бортового перекриття, РС «судно в баласті»

Варіант конструкції борту	Максимальні значення в районі 24-25 шп.		Максимальні значення в районі 29 шп.	
	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
Вихідний	31,43	19,03	27,82	19,03
З подовженими проміжними шпангоутами	37,16	13,24	21,96	13,24
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	—	—	—	—

Величини розмахів номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень у «гарячій точці» для різних варіантів конструкції бортового покриття, розраховані на базі таблиць 4.2.3-4.2.4, наведено в таблиці 4.2.5.

Таблиця 4.2.5. – Величини розмахів номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень для різних варіантів конструкції бортового покриття

Варіант конструкції борту	Максимальні значення σ_p^Σ в районі 24-25 шп, МПа		Значення σ_p^Σ посередині відсіку в районі 29 шп., МПа	
	«Судно у повному вантажі»	«Судно в балласті»	«Судно у повному вантажі»	«Судно в балласті»
Вихідний	119,13	50,46	86,23	46,85
З подовженими проміжними шпангоутами	103,84	50,4	88,75	35,2
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	82,63	—	76,07	—

Аналогічні таблицям 4.2.3-4.2.4 дані представлені в таблицях 4.2.6-4.2.7, однак, в даному випадку моменти опору перерізів шпангоутів були зменшені з врахуванням корозійної надбавки за 25 років.

Таблице 4.2.6 – Величини розмахів номінальних напружень у «гарячій точці» від згину перекриття та згину балки для різних варіантів конструкції бортового перекриття з врахуванням корозійного зносу, РС «судно в повному вантажу»

Варіант конструкції борту	Максимальні значення в районі 24-25 шп.		Максимальні значення в районі 29 шп.	
	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
Вихідний	105,8	35,58	66,78	35,58
З подовженими проміжними шпангоутами	94,24	25,24	79,35	25,24
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	71,54	26,31	63,76	26,31

Таблице 4.2.7 – Величини розмахів номінальних напружень у «гарячій точці» від згину перекриття та згину балки для різних варіантів конструкції бортового перекриття з врахуванням корозійного зносу, РС «судно в баласті»

Варіант конструкції борту	Максимальні значення 24-25 шп.		Значення посередині відсіку в районі 29 шп.	
	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
Вихідний	37,31	22,59	33,02	22,59
З подовженими проміжними шпангоутами	43,79	15,6	25,88	15,6
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	—	—	—	—

Величини размахов номинальных эквивалентных эксплуатационных напряжений в «горячей точке» для различных вариантов конструкции бортового перекрытия, рассчитанные на базе таблиц 3,4,5–3,4,6 и формулы (3,1,2), представлены в таблице 3.4.7.

Величини розмахів номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень у «гарячій точці» для різних варіантів конструкції бортового перекриття, розраховані на базі таблиць 4.2.6-4.2.7 наведені в таблиці 4.2.8.

Таблиця 4.2.8 – Величини розмахів сумарних номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень в «горячій точці» для різних варіантів конструкції бортового перекриття, отримані з врахуванням впливу корозійного зносу

Варіант конструкції борту	Максимальные значения σ_p^Σ в районе 24-25 шп.,, МПа		Значения σ_p^Σ посередине отсека в районе 29 шп.,, МПа	
	«Судно у повному вантажі»	«Судно в балласті»	«Судно у повному вантажі»	«Судно в балласті»
Вихідний	141,38	59,9	102,36	55,61
З подовженими проміжними шпангоутами	119,48	59,39	104,59	41,48
З подовженими проміжними шпангоутами і посиленням бортовим стрингером	97,85	—	90,07	—

Висновки із розділу 4

- Встановлено величини розмахів внутрішніх зусиль від згину бортового перекриття та балки, що діють у досліджуваному вузлі, та відповідні величини розмаху номінальних напружень у «гарячій точці» для вихідного та двох удосконалених варіантів конструкції борту.
- Встановлено величини розмахів сумарних номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень в «гарячій точці» для різних варіантів конструкції бортового перекриття, отримані з врахуванням впливу корозійного зносу.
- Встановлено, що в удосконалених варіантах конструкції борту еквівалентні експлуатаційні напруження суттєво зменшуються в порівнянні із вихідним варіантом конструкції.

ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд проблеми появи втомних тріщин у конструкціях траулера через дію підвищених навантажень у них. Виконано огляд проблеми визначення змінних експлуатаційних напружень у констурктивних вузлах корпусів суден.
2. Встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції судна-траулера при експлуатаційному навантаженні відповідно до норм міцності морських суден.
3. Встановлено, що доцільно застосовувати стержньові елементи для побудови 2-D та 3-D моделей й визначення напружень. Наведено основні залежності методу скінченних елементів.
4. Встановлено величини розмахів внутрішніх зусиль від згину бортового перекриття та балки, що діють у досліджуваному вузлі, та відповідні величини розмаху номінальних напружень у «гарячій точці» для вихідного та двох удосконалених варіантів конструкції борту.
5. Встановлено величини розмахів сумарних номінальних еквівалентних експлуатаційних напружень в «горячій точці» для різних варіантів конструкції бортового перекриття, отримані з врахуванням впливу корозійного зносу.
6. Встановлено, що в удосконалених варіантах конструкції борту еквівалентні експлуатаційні напруження суттєво зменшуються в порівнянні із вихідним варіантом конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Литвиненко Д. Ю. Методики розв'язку задач втомної міцності суднокорпусних вузлів при нерегулярному навантаженні на базі експериментально-теоретичного методу. Вісник Одеського національного морського університету. Одеса, 2017. № 4 (53). С. 110–125.
2. Petinov S.V. In-Service Fatigue Reliability of Structures. Springer International Publishing, 2018. 201 p.
3. Korostylov, L., Lytvynenko, D., Sharun, H., Davydov, I. (2021). Improvement of construction of trawler's hull based on condition of fatigue strength providing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (112)), 50–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239159> (Scopus).
4. Нормы прочности морских судов. Ленинград: Регистр СССР, 1991.
5. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден т. 2. 2020.
6. Проектування конструктивного мідель-шпангоута суховантажних суден: Методичні вказівки / В. Г. Матвєєв, А. І. Кузнєцов, Б. М. Мартинець, Б. М. Михайлов, О. М. Узлов, М. О. Цибенко, Г. В. Шарун. Миколаїв: УДМТУ, 2002. 76 с.
7. Сердюченко А. М., Лугінін О. Є., Коршиков Р. Ю., Дудченко О. М., Коршиков Ю. С. Основи теорії пружності, будівельної механіки, міцності, та вібрації суден: навчальний посібник / за ред. А. М. Сердюченка. Миколаїв: НУК, 2012. 422 с.
8. Moaveni, S. (2003) Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.