

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова
Навчально науковий інститут (факультет) Кораблебудівний

Кафедра будівельної механіки та конструкції корпусу корабля

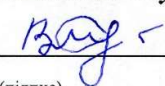
«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

 Л.І. Коростильов
« 25 » 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
на тему: Дослідження експлуатаційних напружень
у конструкціях суховантажного судна

Виконав: студент 6118мх групи

 Вдовиченко М. О.
(підпис)

Керівник роботи:

ст. викл. каф. БМ та ККК, к.т.н.

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

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.

«25» 12 2024 року

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

Вдовиченко Микола Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження експлуатаційних напружень у конструкціях суховантажного судна»

«Research of operational stresses in structures of the dry cargo ship»

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-г2

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. Диферентівка судна

3. Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна

4. Основні положення методу скінченних елементів

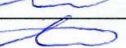
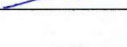
5. Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі

5. Перелік презентаційних матеріалів:

5.1 Презентація магістерської роботи

5.2

6. Консультанти розділів роботи

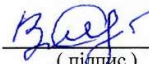
Розділ	ПіБ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Литвиненко Д. Ю.		
2	Литвиненко Д. Ю.		
3	Литвиненко Д. Ю.		
4	Литвиненко Д. Ю.		
5	Литвиненко Д. Ю.		

7. Дата видачі завдання 01.09.2024

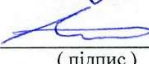
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Загальний опис проблеми	20.09.2024	
2	Диферентовка судна	10.10.2024	
3	Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна	10.11.2024	
4	Основні положення методу скінченних елементів	01.12.2024	
5	Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі	20.12.2024	

Студент

Вдовиченко М. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Литвиненко Д. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Вдовиченко М.О. «Дослідження експлуатаційних напружень у конструкціях суховантажного судна». Кваліфікаційна робота зі спеціальності 135 «Суднобудування», освітньої програми «Суднокорпусобудування». Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. 2024 рік.

Виконано диферентовку судна та встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції суховантажного судна за нормами міцності морських суден. Розроблено плоска стержньова скінченно-елементна модель суднового перекриття та стержньову тривимірну модель відсіку. Визначено розмахи сумарних еквівалентних напружень із експлуатаційною забезпеченістю, що діють на суднокорпусний вузол перетину шпангоуту із другим дном в районі середини другого вісіку судна із використанням обох моделей. Порівняно результати розрахунків.

Ключові слова: скінченно-елементний аналіз, напруження, експлуатаційні навантаження, суднокорпусний вузол, стержньовий скінченний елемент

ANNOTATION

Vdovychenko M.O. “Research of operational stresses in structures of the dry cargo ship”. Qualification work in the specialty 135 “Shipbuilding”, educational program ‘Shipbuilding’. Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 2024.

Trimming of the vessel has been performed. Local loads on the the hull structures of a dry cargo ship have been calculated according to the strength standards for seagoing vessels. The beam finite element model of the ship's grillages and the three-dimensional beam model of the compartment are developed. Ranges of the total equivalent stresses with service probability acting on the structural joint of the intersection of the frame with the double bottom were obtained in the midship area using both models. The results of the calculations are compared.

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

ЗМІСТ

ВСТУП

1. Загальний опис проблеми

1.1. Загальний опис суховантажних суден

1.2. Опис проблеми визначення експлуатаційних напружень

1.3. Висновок із розділу 1

2. Диферентовка судна

2.1. Диферентовка судна

2.2. Висновок із розділу 1

3. Визначення розмахів зовнішніх навантажень на корпус судна

3.1. Розрахунок величин згинального моменту із експлуатаційною забезпеченістю у перерізі мідель-шпангоуту

3.2. Розрахунок величин розмахів місцевих навантажень на конструкції днищевих перекриттів

3.3. Розрахунок величин розмахів місцевих навантажень на конструкції бортових перекриттів

3.4. Висновки із розділу 3

4. Основні положення методу скінченних елементів

5. Визначення розмаху еквівалентних експлуатаційних напружень у конструктивному вузлі

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

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

5.3. Висновки з розділу 5

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТОК А

ВСТУП

Актуальність досліджень. Суднокорпусні конструкції сприймають змінні навантаження різного походження. Такі навантаження призводять до зародження втомних тріщин в осередках концентрації напружень. Забезпечення втомної міцності, поряд із забезпеченням граничної міцності, є умовою визначення розмірних параметрів конструктивних вузлів.

Однотипні конструктивні вузли можуть знаходитись в різних частинах корпусу судна за довжиною та висотою. Вони будуть зазнавати навантажень різної інтенсивності. У кінцевостях досягають найбільших значень величини змінного тиску на корпус від дії заборотної води, інерційні та ударні навантаження. В той же час вертикальний згинальний момент, обумовлений почерговими переходами судна з підосви на вершину хвиль, приймає найбільших значень в районі циліндричної вставки. Величини згинального моменту від загального поздовжнього згину корпусу на хвилях, а також змінних тисків, змінюються за висотою корпусу.

Для визначення втомної міцності суднокорпусних конструкцій потрібно мати значення еквівалентних експлуатаційних напружень, які являють собою комбінацію розмахів напружень від загального повздовжнього згину корпусу судна, згину перекриття та балки у досліджуваній точці. На базі таких напружень можна побудувати їх довготерміновий розподіл та оцінити втомну міцність та довговічність у досліджуваній точці.

Еквівалентні експлуатаційні напруження можуть бути визначені на базі 2-вимірних ізольованих від корпусу судна моделей, на базі 3-вимірних моделей. Ці моделі можуть бути побудовані з використанням стержньових, пластинчастих, 3-вимірних елементів.

Інтерес представляє порівняння між собою різних моделей та підходів до визначення еквівалентних експлуатаційних напружень.

Мета роботи – дослідити експлуатаційні еквівалентні напруження у корпусних конструкціях суховантажного судна на базі 2-вимірних та 3-вимірних стержневих моделей конструкцій.

Завдання роботи:

1. Вибрати типовий суднокорпусний вузол суховантажника для дослідження еквівалентних експлуатаційних напружень
2. Виконати диферентовку судна та розрахунок еквівалентного бруса.
3. Визначити розмахи зовнішніх навантажень на корпус судна в досліджуваних районах із експлуатаційною забезпеченістю за нормативними документами.
4. Побудувати 2-вимірні та 3-вимірні скінченно-елементні моделі суднокорпусних конструкцій
5. Визначити та порівняти еквівалентні експлуатаційні напруження, розраховані за допомогою 2- та 3-вимірних моделей

Об'єктом дослідження є явище зміни 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	Вдовиченко М. О.								
Керівник	Литвиненко Д. Ю.								
Зав. каф.	Коростильов Л. І.					НУК			

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНИЙ ОПИС ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальний опис суховантажних суден

Універсальні суховантажні судна загального призначення є дуже поширеними (див. рис. 1). Такі судна мають наступні особливості:

- можуть використовуватися для перевезення будь-яких генеральних вантажів - насипних, упакованих у фасувальну тару (у мішки, бочки, ящики тощо) або розміщених у спеціально відведеному місці, а також штучних, що являють собою конкретний об'єкт вантажоперевезень (автомобілі, устаткування та ін.), у тому числі великотоннажних і негабаритних;
- мають бортові вантажні пристрої (вантажопідйомне обладнання) для самостійного виконання роботи з навантаження-розвантаження;
- мають дві палуби і вантажні трюми великого обсягу, на які припадає основна частина корпусу;
- можуть мати рефрижераторний трюм для розміщення вантажів, що вимагають особливого температурного режиму.

Суховантажники мають просторі приміщення для перевезення вантажів, що розташовуються в трюмах і займають основну частину корпусу. Машинне відділення зазвичай розташоване в кормі судна або трохи зрушене в ніс. На суховантажах для навантаження і розвантаження є свої підйомні засоби крани або стріли. Залежно від величини судна підйомні засоби можуть бути до 10 т на невеликих суховантажах, від 30 до 200 т для великих суден.



Рис. 1. Приклад суховантажного судна

Вантажопідйомність універсального суховантажника близько 4-6 тис. тонн, а великих - 16-25 тис. тонн. Швидкість відповідно від 14 до 16 вузлів і від 20 до 22 вузлів.

До спеціалізованих суховантажів відносяться контейнерні та трейлерні судна, судна для навалювальних вантажів, лісовози та рефрижератори. Усі спеціалізовані судна мають свої індивідуальні особливості експлуатації та додаткової підготовки в екіпажу.

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 почегово 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.

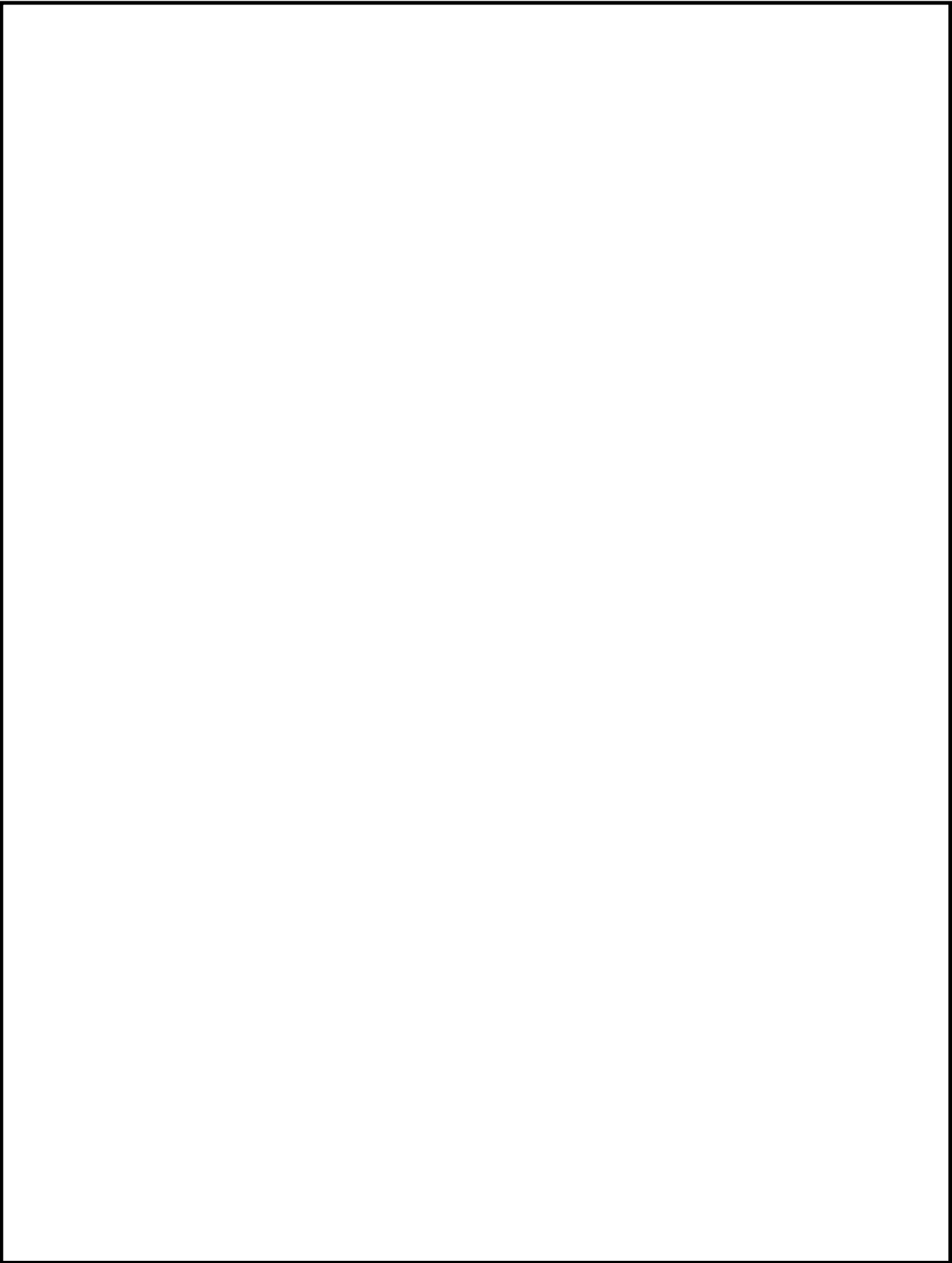
Величини складових напружень від загального повздовжнього згину судна у вертикальній площині σ_1 , від згину перекриття σ_2 та згину балки σ_3 при використанні балкової моделі відсіку визначаються за формулою

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

де M_z , M_p , 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.

Висновок із розділу 1

Виконано огляд проблеми визначення змінних експлуатаційних напружень у суднокорпусних конструкціях.



					19.МР.135.6118мх.03.ПЗ.02			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Диферентовка судна	Літ.	Арк.	Акрушів
Студент		Вдовиченко М. О.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 2

ДИФЕРЕНТОВКА СУДНА

2.1. Диферентовка судна

Схема повздовжнього розрізу універсального суховантажного судна, втомна міцність конструктивних вузлів якого досліджувалась представлена на рис. 2.1.

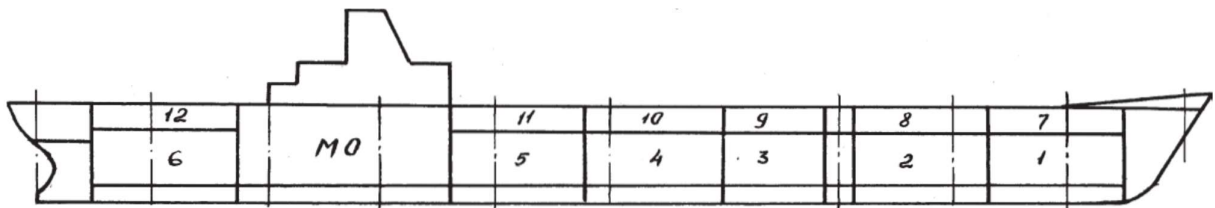


Рис. 2.1 Схема поздовжнього перерізу універсального суховантажника

Характеристики судна є наступними:

- довжина між перпендикулярами $L_{pp} = 139$ м;
- ширина $B = 19,4$ м;
- висота борту $D = 12,2$ м;
- висота твіндеку $h_{ms} = 0,3D$;
- водотонажність судна $\Delta = 15400$ т;
- швидкість ходу $v_s = 20$ вуз;
- границя плинності матеріалу $\sigma_s = 315$ МПа.

Обчислення будуть проведені для наступних розрахункових станів (РС) навантаження судна:

2 “Судно в повному вантажі”: Вантаж – 100% ; запаси – 100% ; баласт – 0%.

3 Вантаж – 100% ; запаси – 50% ; баласт – 0%.

4 “Судно в баласті”: Вантаж – 0% ; запаси – 50% ; баласт – 100%.

Вибір таких станів навантаження обумовлений тим, що це найбільш поширені стани. У першому стані судно виходить із порту призначення «у вантажі», повністю, використовуючи свою водотоннажність. У третьому стані судно виходить з порту призначення назад «в баласті», віддавши там вантаж та узявши баласт для компенсації остійності.

Загальна поздовжня міцність судна, представленого на рис. 1, досліджується студентами в рамках курсового проекту з курсу “Будівельна механіка корабля”.

Розрахунки розмахів згинальних моментів та навантажень від забортної води і вантажів на конструкції виконуються з врахуванням посадки судна й згинальних моментів на тихій воді. Передбачається, що в нормальних умовах експлуатації судно не повинно мати крену той, чи інший борт.

Умови диферентовки судна на тихій воді мають вигляд:

$$\Delta_0 = \gamma V_0; \quad (2.1)$$

$$x_0 = x_c, \quad (2.2)$$

де Δ_0 – втоннажність судна, т; V_0 – об’єм зануреної частини корпусу, м³.

Диферентовка судна виконувалась в програмі “LS SMK” кафедри будівельної механіки та конструкції корпусу корабля НУК ім. адм. Макарова. Вихідними даними для програми навантаження на шпацию у трьох рорахункових станах судна. Ці дані представлені у таблиці 1.

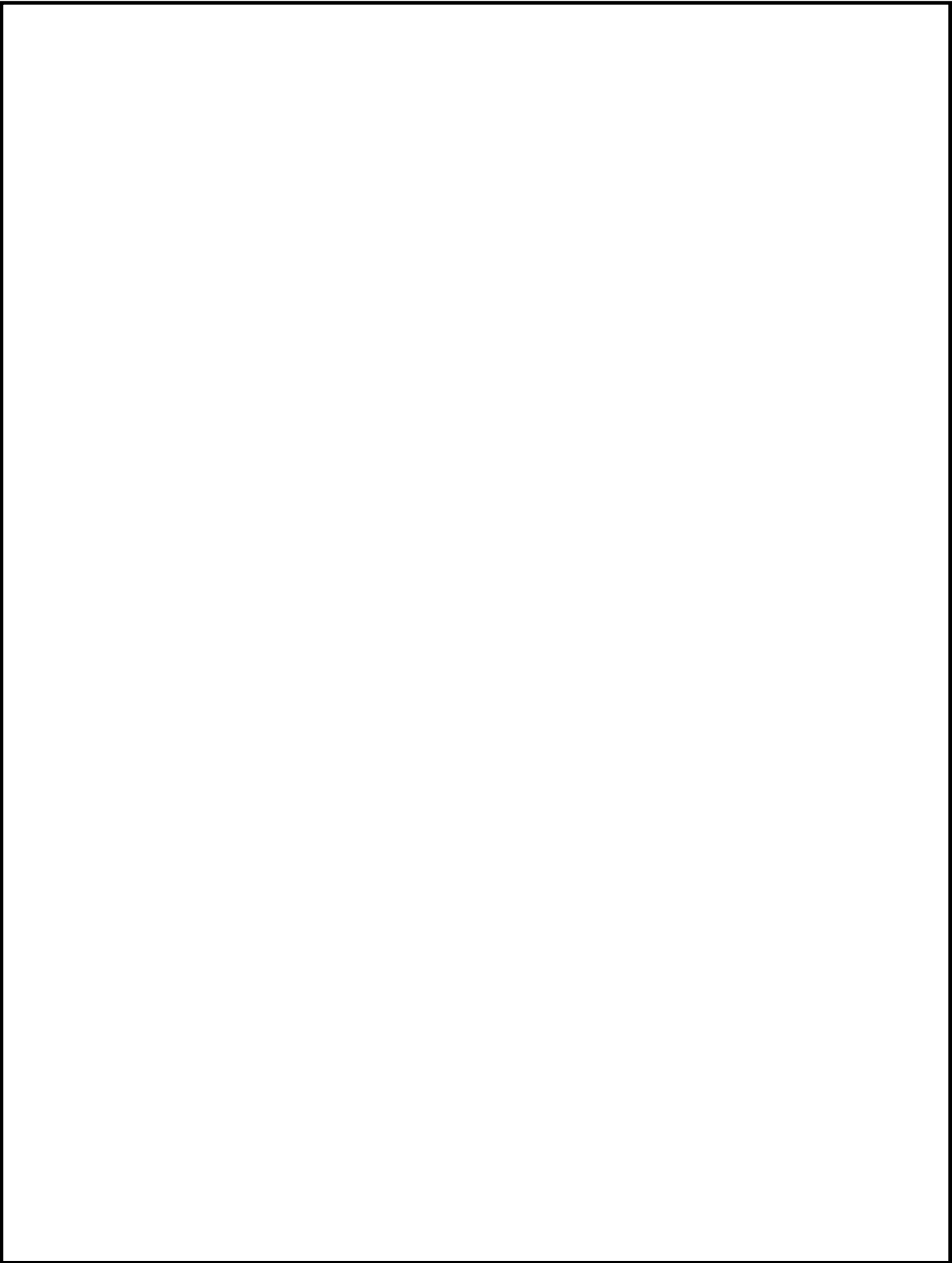
Таблиця 2.1. Розподіл вагового навантаження корпусу судна за шпаціями для трьох розрахункових станів

РС	Навантаження на шпацію, т									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
I	420	1396	2028	2034	2086	2286	1226	1252	1528	1144
II	420	1396	1992	1996	2048	2248	1136	994	1392	1032
III	608	792	1424	1468	664	468	520	994	660	1096

Результати диферентовки представлені у додатку А. Для розрахунку розмахів хвильового згинального моменту згідно норм міцності [4] необхідно мати значення осередненого в межах середньої частини судна довжиною $0,2L_{pp}$ згинального моменту на тихій воді $M_{\text{ТВ}}$. Ці значення для РС “судно у повному вантажі” та “судно в баласті” є такими: $(M_{\text{ТВ}})_{\text{вант}} = 306076 \text{ кН}\cdot\text{м}$; $(M_{\text{ТВ}})_{\text{бал}} = 484587 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

2.2. Висновок із розділу 2

Виконано диферентовку судна, використовуючи програмне забезпечення кафедри.



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

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМАХІВ ЗОВНІШНІХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОРПУС СУДНА

3.1 Розрахунок величин згинального моменту із експлуатаційною забезпеченістю у перерізі мідель-шпангоуту

Розрахунки втомної міцності конструкцій згідно норм МАКО [5] виконуються на базі експлуатаційних навантажень (забезпеченість $Q = 10^{-5}$), які визначають за нормами міцності морських суден [4].

Величини хвильових моментів із експлуатаційною забезпеченістю розраховуються за формулою

$$M_{Bi} = \frac{h_i}{2} k_1(\alpha) \chi_0 \chi_1 B L_{pp}^2 \phi_m(x), \text{кН}\cdot\text{м}, \quad (3..)$$

де $k_1(\alpha)$ – коефіцієнт статичної постановки судна на розрахункову хвилю; h_1 – висота еквівалентних розрахункових хвиль; χ_0 – гідродинамічний поправковий коефіцієнт; χ_1 – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості судна на хвилюванні Fr_{xb} та згинального моменту на тихій воді M_{TB} ; $\phi_m(x)$ – функція, що враховує розподіл згинального моменту за довжиною судна.

Зазначені величини знаходиться за наступними залежностями

$$h_1 = k_c c_w, \text{м}; \quad (3.2)$$

$$k_c = 1,05 - \frac{2425}{L_{pp}^2 + 8530} \leq 1; \quad (3.3)$$

$$c_w = 10,75 - \left(\frac{300 - L_{pp}}{100} \right)^{3/2} \leq 10,75; \quad (3.4)$$

$$k_1(\alpha) = 0,6\alpha - 0,17 \quad (3.5)$$

$$\chi_0 = (1,3 - 2 \frac{B}{L_{pp}}) (0,65 - 2,1 \frac{d}{L_{pp}}) \quad (3.6)$$

$$\chi_1 = 1,2 - 0,3\alpha - (3 + 20Fr^B) \frac{M_{ms}}{10\Delta \cdot L} + (4,2 - 4\alpha)Fr^B \quad (3.7)$$

$$Fr^B = 0,125Fr^0 \left[2,5 + 1,5 \left(\frac{L_{pp}}{100} \right)^{2/3} \right] \quad (3.8)$$

де число Фруда $Fr = (0,5148 \cdot v_s) / \sqrt{gL_{pp}} = (0,5148 \cdot 20) / \sqrt{9,81 \cdot 139} = 0,279$.

Значення Fr^B повинні бути не меншими за значення

$$Fr_p = 0,21[1 - (d_b - 0,25)^{2/3}] + [2,5 - 1,1(d_b - 0,25)^{1/2}] \times (0,9 - \alpha)^2, \quad (3.9)$$

де $d_b = 10d/L_{pp} \geq 0,25$.

Для перерізу мідель-шпангоута $\phi_m(x) = 1$.

Результати розрахунків зведені до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Розрахунок нормативного значення хвильового згинального моменту із експлуатаційною забезпеченністю в перерізі мідель-шпангоуту

№	Величина	Розрахунковий стан	
		I	III
1	2	3	4
3	Осадка на мідель-шпангоуті d , м	8,524	5,45
4	Коефіцієнт повноти площі ВЛ α	0,787	0,724
5	Висота еквівалентних розрахункових хвиль h_1 , м	8,380	8,380

Продовж. табл. 3.1.

1	2	3	4
6	Коефіцієнт статичної постановки судна на розрахункову хвилю, $k_1(\alpha)$	0,302	0,264
7	Гідродинамічний поправковий коефіцієнт, χ_0	0,530	0,580
8	Число Фруда, Fr	0,278	0,278
9	Число Фруда, що відповідає максимальній швидкості судна на хвилях, Fr^B	0,152	0,152
10	Число Фруда, що відповідає максимальній швидкості судна на хвилях (граничне значення), Fr_p	0,125	0,125
11	Осереднене в межах середньої частини судна значення згинального моменту на тихій воді M_{TB} , кНм	306076	494587
12	Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості судна на хвилюванні та згинального моменту на тихій воді, χ_1	1,037	1,060
13	Хвильовий згинальний момент із експлуатаційною забезпеченістю M_1 , кН·м	261100	524675

Функція розподілу величини згинального моменту за довжиною судна згідно із [4] має наступний вигляд:

$$\varphi_M(x) = \begin{cases} 2,85 \frac{x}{L_{pp}} & \text{при } 0 < \frac{x}{L_{pp}} < 0,35 \\ 1 & \text{при } 0,35 \leq \frac{x}{L_{pp}} \leq 0,6 \\ -2,5 \left(\frac{x}{L_{pp}} - 1 \right) & \text{при } \frac{x}{L_{pp}} > 0,6 \end{cases}, \quad (3.10)$$

де x – відстань від носового перпендикуляру судна.

Результати розрахунків значень хвильового згинального моменту з експлуатаційною забезпеченістю для середин відсіків № 2–5 судна, представленого на рис. 3.1, наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Розрахунок нормативного значення хвильового згинального моменту із експлуатаційною забезпеченістю в перерізі мідель-шпангоуту

Номер відсіку	Відстань від НП x , м	$\varphi_M(x)$	Значення згинального моменту для РС I $(M_{B1})_B$, кН·м	Значення згинального моменту для РС III $(M_{B1})_6$, кН·м
2	34,750	0,713	186164	181926
3	49,382	1,000	261100	255156
4	65,232	1,000	261100	255156
5	81,083	1,000	261100	255156

3.2 Розрахунок величин розмахів місцевих навантажень на конструкції днищевих перекриттів

Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні розрахункової ВЛ згідно [4] визначається формулою

$$p_{в0} = \rho g \frac{h_1}{2} a_v a_x, \text{ кПа} \quad (3.11)$$

де розрахункова висота хвилі h_1 визначається за таблицею 2.1.1; $\rho = 1,025$ т/м³ – густина морської води; $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння; a_v, a_x – функції розмірних параметрів судна, параметрів посадки, руху судна. Значення a_x залежить від положення точки, що розглядається за довжиною судна.

Ці величини визначають за наступними формулами:

$$a_v = 1,5 + 0,8 \frac{v_s}{\sqrt{L_{pp}}} \left(0,4 + \frac{L_{pp}}{10^3} \right) K_\sigma, \quad (3.12)$$

$$a_x = K_x \left(1 - \frac{2x_\pi}{L_{pp}} \right), \quad (3.13)$$

де $K_\sigma = 1$; x_π – відстань від точки, що розглядається до найближчого до неї перпендикуляру (носового та кормового); $K_x = 1,25$ для перерізів в ніс від мідель-шпангоута, $K_x = 0,75$; $a_v a_x \geq 1,15$.

Розмах хвильових тисків на днищове перекриття визначається за формулою

$$p_B^д = p_{в0} \chi_0 \left(\frac{B_1}{L_{pp}}, \frac{d}{L_{pp}} \right), \text{ кПа} \quad (3.14)$$

де B_1 – ширина корпусу судна в даному перерізі, м; а величина χ_0 розрахується за формулою

$$\chi_0 = \left(1,3 - 2,0 \frac{B_1}{L_{pp}} \right) \left(0,65 - 2,1 \frac{d}{L_{pp}} \right). \quad (3.15)$$

Розмах тиску від вантажу на друге дно із експлуатаційною забезпеченістю

$$p_{\text{вант}} = 2\rho_{\text{вант}} g h_{\text{вант}} \left(1 + \frac{a_z}{g} \right), \text{ кПа}, \quad (3.16)$$

де $h_{\text{вант}}$ – висота укладки вантажу, м; $\rho_{\text{вант}} = 0,6 \text{ т/м}^3$ – питома вага вантажу; a_z – розрахункове значення вертикального прискорення від повздовжньої хитавиці судна, яка розраховується за формулою

$$a_z = \sqrt{a_{cz}^2 + a_{kz}^2 + 0,4 \cdot a_{\delta z}^2}, \text{ м/с}^2, \quad (3.17)$$

де a_{cz} – проекція прискорення центра тяжіння судна на відповідний напрям, м/с^2 ; a_{kz} , $a_{\delta z}$ – проекція прискорень у точці, що розглядається від кільової та бортової хитавиці на відповідні напрямки, м/с^2 . Ці величини визначають за наступними формулами:

$$a_{cz} = 0,20K_1 \left(\frac{100}{L_{pp}} \right) g\mu_1, \text{ м/с}^2; \quad (3.18)$$

$$a_{kz} = 2\pi g \left(1 + 2,5Fr^6 \right) \frac{x_0}{L_{pp}} \psi, \text{ м/с}^2; \quad (3.19)$$

$$a_{\delta z} = \left(\frac{2\pi}{T_{\delta}} \right) \theta y_0, \text{ м/с}^2, \quad (3.20)$$

де $K_1 = 1$ при визначенні експлуатаційних навантажень; $\mu_1 = 1$; ψ – розрахунковий кут хитавиці, рад; θ – розрахунковий кут бортової качки, рад; x_0 , y_0 – відстань точки, що розглядається, від вертикальної та поперечної площини, що проходить через центр тяжіння; T_{δ} – розрахунковий період бортової хитавиці на хвилюванні, с; ψ – розрахунковий кут кільової хитавиці, рад; θ – розрахунковий кут бортової хитавиці, рад.

Розрахунковий період бортової хитавиці на хвилюванні розраховується за формулою:

$$T_{\delta} = \begin{cases} \frac{1}{2}(T_c + T_h) \text{ при } T_c \leq 1,6T_h \\ \left[1 + 0,77 \left(\frac{T_h}{T_c} \right)^2 \right] T_h \text{ при } T_c \geq 1,6T_h \end{cases}, \text{ с}, \quad (3.21)$$

де T_c – власний період бортової качки судна тихій воді, с; T_h – середній період розрахункового режиму хвилювання. Останню можна визначити за формулою

$$T_h = 9\mu_1^{0,5}, \text{ с.} \quad (3.22)$$

Вечина T_c у першому наближенні може бути визначена за формулою

$$T_c = \frac{0,78B}{\sqrt{h_m}}, \text{ с,} \quad (3.23)$$

де $h \approx 0,07\beta$, м для судна у повному вантажі; β – коефіцієнт повноти мідель-шпангоута.

Для танкерів в баласті можна наближено визначити T_c наступним чином:

$$T_c = 3\sqrt[3]{B}, \text{ с.} \quad (3.24)$$

Рекомендації щодо визначення величини T_c для суховантажних суден в РС “судно в баласті” в нормах міцності [4], нажалі, відсутні. Тому, залежність (3.24) застосовувалась для розрахунку відповідних значень для суховантажного судна, що розглядалось.

Результати розрахунків розмахів навантажень на днище судна від дії моря та вантажу для середин відсіків 2–5 представлені у таблицях 3.3–3.6. Номера відсіків відповідають представленим на рис. 2.1.

Величини ψ , θ визначаються за наступними формулами:

$$\psi = K_i \left(0,155 - 0,04 \frac{L_{pp}}{100} \right) \mu_i, \text{ рад;} \quad (3.25)$$

$$\theta = K_i \left(0,51 - 0,1 \frac{L_{pp}}{100} \right) \mu_i, \text{ рад.} \quad (3.26)$$

Сумарний тиск на днищеве перекриття для розрахункового стану «судно у повному вантажі» відповідно до [5] визначається за формулою

$$p_{\partial}^{\Sigma} = \sqrt{(p_{\text{вант}})^2 + (p_{\text{в}}^{\text{д}})^2} + p_{\text{вант}} \cdot p_{\text{в}}^{\text{д}}, \text{ кПа.} \quad (3.27)$$

Сумарний тиск на днищеве перекриття для розрахункового стану «судно в баласті» визначалось за тією ж формулою, при цьому вантажем вважалась вода, що знаходиться в міждонному просторі в даному розрахунковому стані.

Таблиця 3.3. Розмахи гідродинамічних навантажень на днищові перекриття посередині 2–5 відсіків в РС «судно в повному вантажі»

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Осадка в даному перерізі d , м	8,65	8,65	8,65	8,65
2	Відстань від точки, що розглядається, до найближчого до неї перпендикуляру $x_{\text{п}}$, м	34,75	49,38	65,23	58,22
3	Добуток $a_{\text{в}} a_{\text{х}}$	1,40	1,15	1,15	1,15
4	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні розрахункової ВЛ $p_{\text{в}0}$, кПа	13,96	11,51	11,51	11,51
	Величина χ_0	0,53	0,53	0,53	0,53
	Розмах хвильових тисків на днищеве перекриття $p_{\text{в}}^{\text{д}}$, кПа	7,40	6,10	6,10	6,10

Таблиця 3.4. Розмахи гідродинамічних навантажень на днищові перекриття посередині 2–5 відсіків в РС «судно в баласті»

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Осадка в даному перерізі d , м	6,16	5,92	8,65	8,65
2	Відстань від точки, що розглядається, до найближчого до неї перпендикуляру $x_{п}$, м	34,75	49,38	65,23	58,22
3	Добуток $a_y a_x$	1,40	1,15	1,15	1,15
4	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні розрахункової ВЛ $p_{в0}$, кПа	13,96	11,51	11,51	11,51
5	Величина χ_0	0,57	0,57	0,58	0,57
6	Розмах хвильових тисків на днищове перекриття $p_{в}^д$, кПа	7,94	6,59	6,63	6,61

Таблиця 3.5. Розмахи навантажень на днищові перекриття посередині 2–5 відсіків в РС «судно в повному вантажі»

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Висота укладки вантажу $h_{\text{вант}}$, м	6,69	6,69	6,69	6,69
2	Відстань від точки, що розглядається, до вертикальної площини, що проходить через центр тяжіння судна x_0 , м	35,36	20,73	4,88	10,67
3	Проекція прискорення центра тяжіння судна на відповідний напрям a_{cz} , м/с ²	1,76	1,76	1,76	1,76
4	Розрахунковий кут кільової хитав. ψ , рад	0,10	0,10	0,10	0,10
5	Розрахунковий кут бортової хитав. θ , рад	0,37	0,37	0,37	0,37
6	Розрахунковий період бортової хитамиці на хвилюванні T_6 , с	10,99	10,99	10,99	10,99
7	a_{kz} – проекція прискорень у точці, що розглядається від кільової хитамиці на вісь OZ, м/с ²	2,97	1,74	0,41	0,90
8	a_{6z} – проекція прискорень у точці, що розглядається від бортової хитамиці на вісь OZ, м/с ²	0	0	0	0
9	Розрахункове значення вертикального прискорення в заданій точці судна від повздовжньої хитамиці судна a_z , м/с ²	3,45	2,48	1,81	1,97
10	Розмах тиску від вантажу на друге дно із експлуатаційною забезп. $p_{\text{вант}}$, кПа	27,71	19,87	14,49	15,84

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
11	Сумарний тиск на днищове перекриття p_d^{Σ} , кПа	32,06	23,52	18,32	19,62

Таблиця 3.6. Розмахи навантажень на днищові перекриття посередині 2–5 відсіків в РС «судно в повному вантажі»

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Висота укладки вантажу $h_{\text{вант}}$, м	1,15	1,15	1,15	–
2	Відстань від точки, що розглядається, до вертикальної площини, що проходить через центр тяжіння судна x_0 , м	33,37	18,74	2,89	–
3	Проекція прискорення центра тяжіння судна на відповідний напрям a_{cz} , м/с ²	1,76	1,76	1,76	–
4	Розрахунковий кут кільової хитавиці ψ , рад	0,10	0,10	0,10	–
5	Розрахунковий кут бортової хитавиці θ , рад	0,37	0,37	0,37	–
6	Розрахунковий період бортової хитавиці на хвилюванні T_6 , с	8,53	8,53	8,53	–
7	a_{kz} – проекція прискорень у точці, що розглядається від кільової хитавиці на вісь OZ, м/с ²	2,80	1,58	0,24	–

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
8	a_{6z} – проекція прискорень у точці, що розглядається від бортової хитавиці на вісь OZ, м/с ²	0	0	0	–
9	Розрахункове значення вертикального прискорення в заданій точці судна від повздовжньої хитавиці судна a_z , м/с ²	3,31	2,36	1,76	–
10	Розмах тиску від вантажу на друге дно із експлуатаційною забезпеченістю $p_{\text{вант}}$, кПа	7,80	5,56	0,84	–
11	Сумарний тиск на днищове перекриття p_d^{Σ} , кПа	13,63	10,53	7,09	–

3.3 Розрахунок величин розмахів місцевих навантажень на конструкції бортових перекриттів

Величини розмахів хвильових тисків відповідно до норм міцності морських суден [4] визначають за наступними формулами:

- нижче рівня розрахункової ватерлінії

$$p_B = p_{B0} \left(1 - 5,5 \frac{d - z_i}{L_{pp}} \right), \text{ кПа}; \quad (3.28)$$

- вище рівня розрахункової ватерлінії

$$p_B = K_B (p_{B0} - \rho_{\text{вант}} g(z_i - d)), \text{ кПа}, \quad (3.29)$$

де z_i – відстань точки прикладання навантаження від основної площини, м; K_B = 1 для надводного борту.

В будь-якому разі для району вище розрахункової ватерлінії розрахунковий тиск не повинен прийматись менше

$$p_{\text{вmin}} = 3 \frac{L_{pp}}{100} + 3,5, \text{ кПа.} \quad (3.30)$$

Результати розрахунків розмахів експлуатаційних тисків від дії моря для РС «судно в повному вантажі» та «судно в баласті», що діють на борт нижче та вище розрахункової ватерлінії, представлені в табл. 3.7–3.8. Розрахунки були виконані для середин відсіків 2–5.

Таблиця 3.7. Розподіл за висотою борту величин розмахів навантажень, що діють на бортове перекриття у серединах відсіків 2–5. РС «судно в повному вантажі»

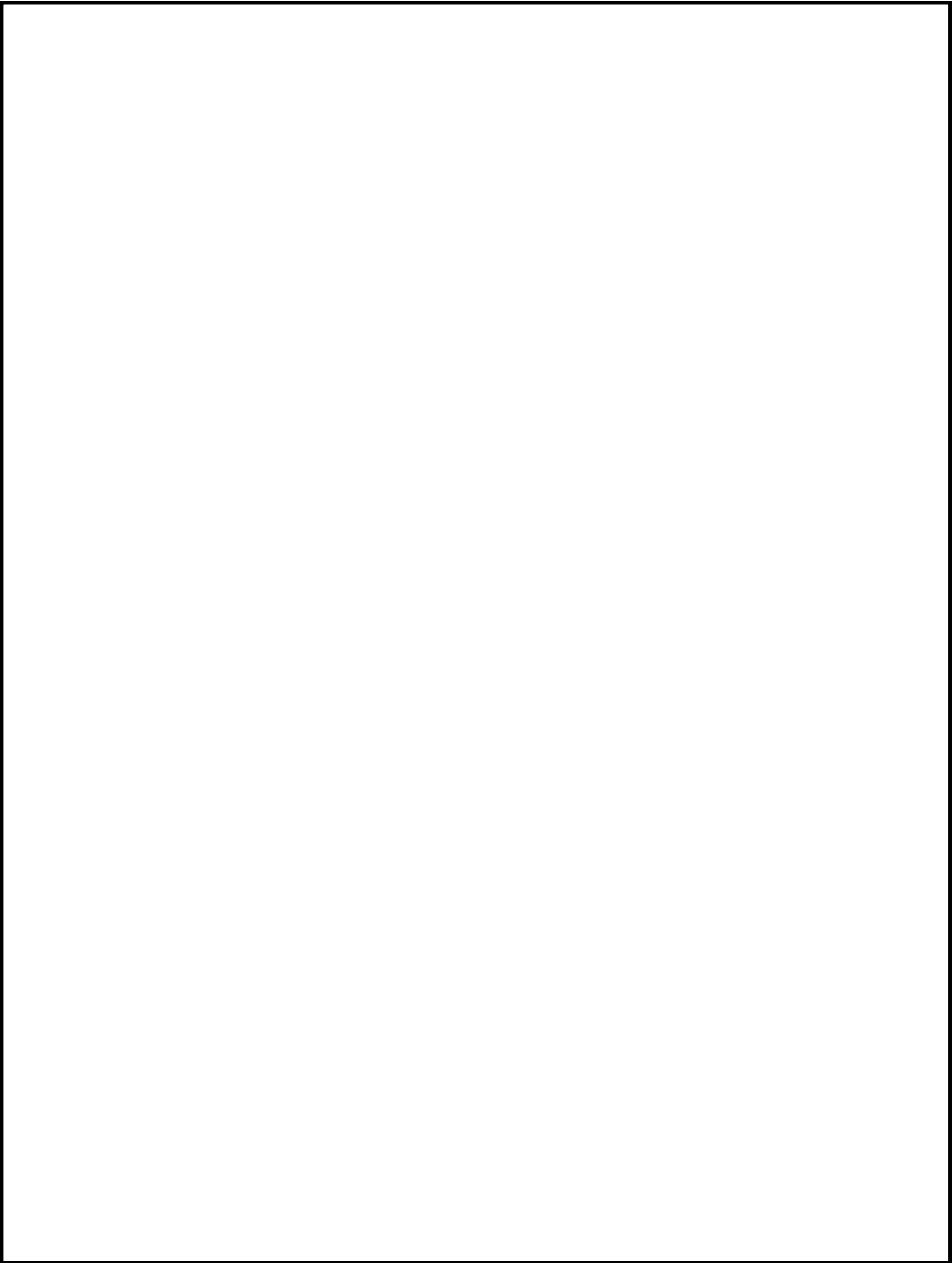
№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Осадка в даному перерізі d , м	8,65	8,65	8,65	8,65
2	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні розрахункової ВЛ $p_{\text{в0}}$, кПа	13,96	11,51	11,51	11,51
3	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні настилу другого дна $p_{\text{вдд}}$, кПа	9,81	8,09	8,09	8,09
4	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні верхньої палуби $p_{\text{ввп}}$, кПа	10,45	10,45	10,45	10,45

Таблиця 3.8. Розподіл за висотою борту величин розмахів навантажень, що діють на бортове перекриття у серединах відсіків 2–5. РС «судно в баласті»

№ п/п	Найменування розрахункової величини	Номер відсіку			
		2	3	4	5
1	Осадка в даному перерізі d , м	6,16	5,92	5,67	5,42
2	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні розрахункової ВЛ $p_{в0}$, кПа	13,96	11,51	11,51	11,51
3	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні настилу другого дна $p_{вдд}$, кПа	11,19	9,34	9,45	9,563
4	Розмах хвильового тиску із експлуатаційною забезпеченістю на рівні верхньої палуби $p_{ввп}$, кПа	10,45	10,45	10,45	10,45

3.4 Висновки із розділу 3

Встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції.



					19.МР.135.6118мх.03.ПЗ.04			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Основні положення методу скінченних елементів	Літ.	Арк.	Акрушів
Студент		Вдовиченко М. О.						
Керівник		Литвиненко Д. Ю.						
Зав. каф.		Коростильов Л. І.				НУК		

РОЗДІЛ 4

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ 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 [11].

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 [12]:

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.

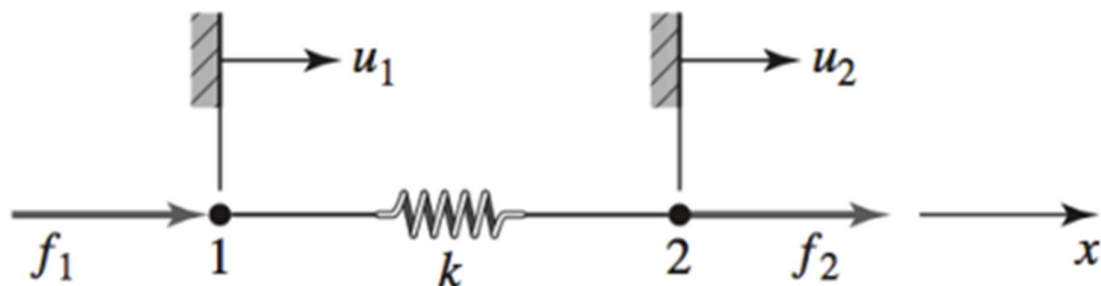


Рис. 4.6. Приклад простішого двовузлового “пружинного” елемента

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

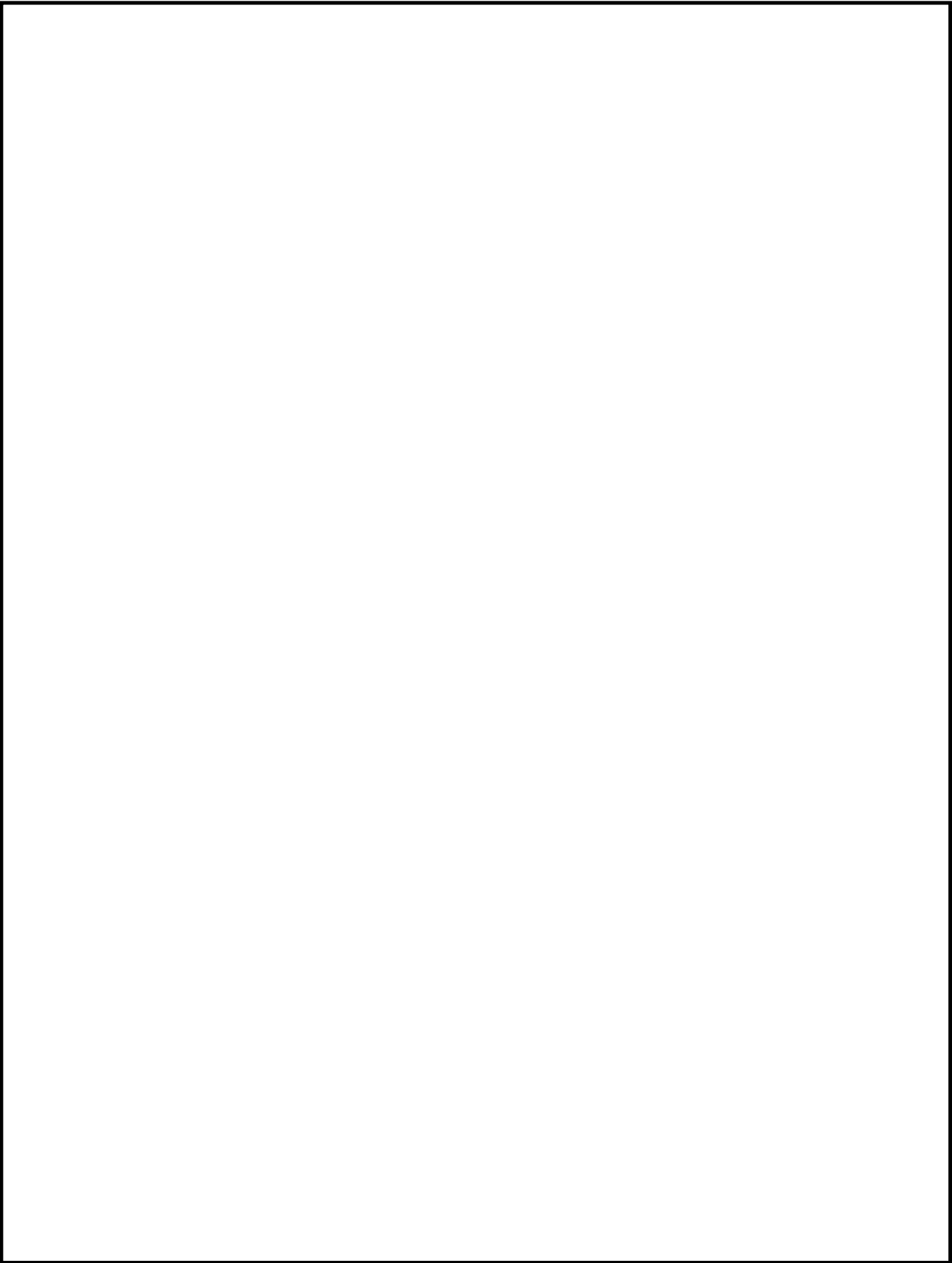
$$\{F\} = [K]\{U\}, \quad (4.4)$$

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.

4.3. Висновки із розділу 4

- Встановлено, що доцільно застосовувати стержньові елементи для побудови 2-D та 3-D моделей й визначення напружень.
- Наведено основні залежності методу скінченних 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 5

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМАХУ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ У КОНСТРУКТИВНОМУ ВУЗЛІ

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

На вузол перетину подвійного дна та шпангоуту діють напруження від згину перекриття σ_2 та згину балки σ_3 . Таким чином, потрібно визначити величини розмахів згинальних моментів $M_{\text{п}}$, $M_{\text{б}}$.

Розрахунок розмахів напружень від згину бортового перекриття $M_{\text{п}}$ виконувався методом скінченних елементів з використанням плоскої ізольованої стержньової моделі. Розрахункова схема бортового перекриття суховантажника представлена на рис. 5.1. Проте, при розрахунку втомної міцності гідростатична складова зовнішнього тиску не враховувалась.

Таким чином розрахунок згинальних моментів в бортовому перекритті зводиться до розрахунку двопрогонної балки.

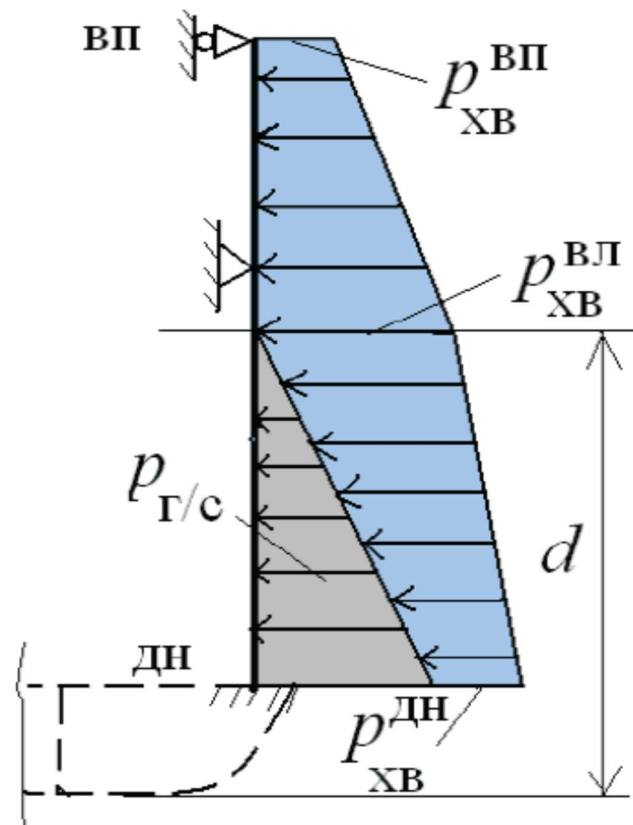


Рис. 5.1. Розрахункова схема бортового перекриття суховантажника

Параметри перекриття, що відповідають рис. 5.2, були такими: висота трюму $h_{тр} = 7,39$ м; висота твіндеку $h_{тв} = 3,66$ м.

Момент інерції поперечного перерізу шпангоута в трюмі визначався засобами Autocad, $I_{шп}^{тр} = 2,11 \cdot 10^{-4}$ м⁴. Поперечний переріз шпангоуту в трюмі представлені на рис. 5.2.

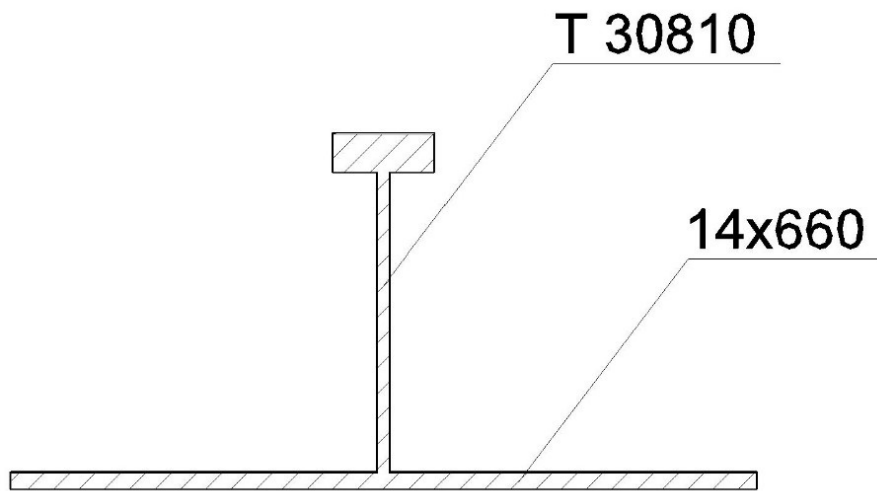


Рис. 5.2. Розрахунковий переріз шпангоуту в трюмі разом з приєднаним пояском

Погонне навантаження q , кН/м, визначалось для трьох точок: на рівні другого дна $q_{\text{Пдн}}$, на рівні розрахункової ватерлінії $q_{\text{ВЛ}}$, на рівні верхньої палуби $q_{\text{ВП}}$. В межах прольоту передбачалось, що воно лінійно змінювалось. Дані щодо погонного навантаження представлено в табл. 5.1. Дані представлені для двох розрахункових станів: «судно в повному вантажі» та «судно в баласті».

Таблиця 5.1. Погонне навантаження q , кН·м, на шпангоут

Для РС I «судно в повному вантажі»			Для РС III «судно в баласті»		
$q_{\text{Пдн}}$, кН/м	$q_{\text{ВЛ}}$, кН/м	$q_{\text{ВП}}$, кН/м	$q_{\text{Пдн}}$, кН/м	$q_{\text{ВЛ}}$, кН/м	$q_{\text{ВП}}$, кН/м
19,43	27,63	20,69	22,16	27,63	20,69

Скінченно-елементна модель шпангоуту для випадку «судно в повному вантажі» із прикладеним навантаженням представлена на Рис. 5.3.

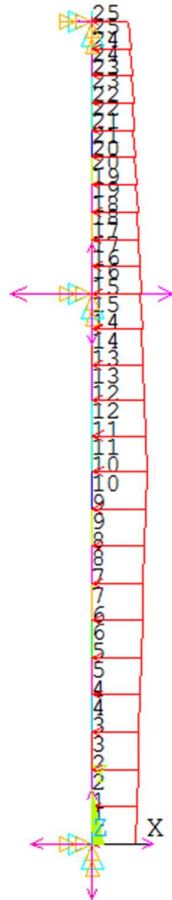


Рис. 5.3. Скінченно-елементна модель бортового перекриття суховантажника

Результати розрахунку згинальних моментів в шпангоуті для РС «судно в повному вантажі» та 2 відсіку судна представлені на рис. 5.4.

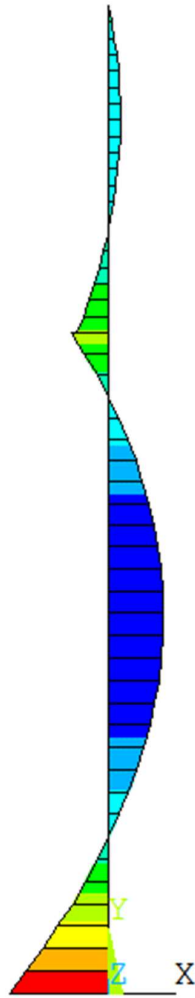


Рис. 5.4. Розподіл згинальних моментів в шпангоуті суховантажника

Результати розрахунку розмахів згинальних моментів в опорному перерізі від згину перекриття $M_{\text{п}}$, кН·м, представлені в табл. 5.2 для РС «судно в повному вантажі» та «судно в баласті». В таблиці також представлено результати розрахунку нормальних напружень σ_2 , МПа, обумовлених згином перекриття.

Таблиця 5.2. Розрахунок розмахів нормальних напружень, обумовлених згином бортового перекриття

Для РС I ($M_{пв}$), кН·м	Для РС III ($M_{пб}$), кН·м	Для РС I (σ_2) _в , МПа	Для РС III (σ_2) _б , МПа
43,14	48,51	45,68	51,36

Розрахунок розмахів напружень від згину балки σ_3 виконувався аналітичними методами. Розрахункова схема балки представлена на рис. 5.5.

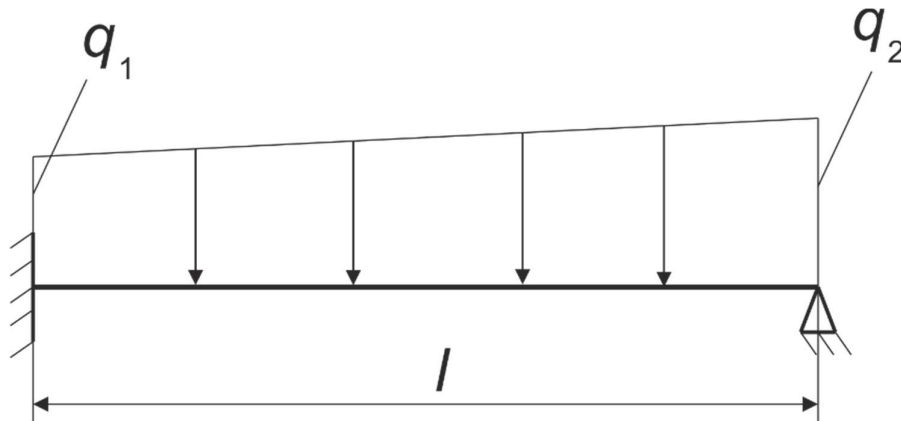


Рис. 5.5. Розрахункова схема балки

Параметри балки є такими: довжина $l = 7,39$ м; момент інерції поперечного перерізу $I_{шп}^{тр} = 2,11 \cdot 10^{-4}$ м⁴; висота балки $h = 0,314$ м; положення нейтральної вісі балки $z_{нвб} = 0,09$ м.

Згинальний момент в опорному перерізі балки визначався за допомогою методу скінченних елементів. Скінченно-елементна модель балки разом із прикладеними навантаженнями представлена на рис. 5.6.

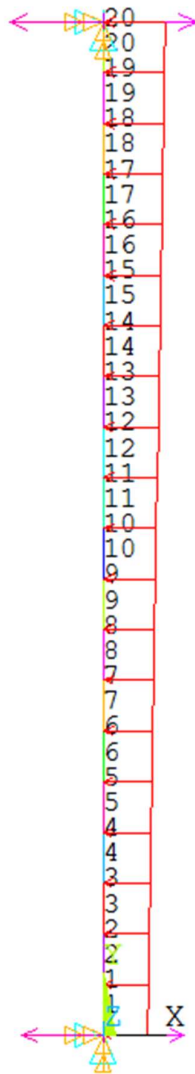


Рис. 5.6. Розрахункова схема балки

Результати розрахунку згинальних моментів в трюмному шпангоуті для РС «судно в повному вантажі» та 2 відсіку судна представлені на рис. 5.7.

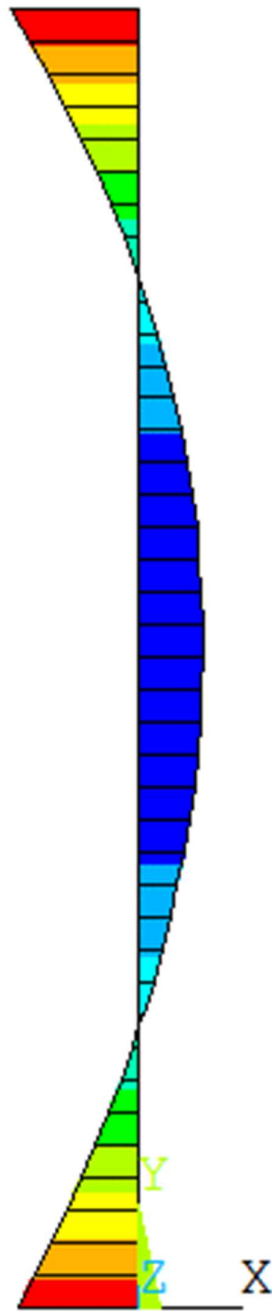


Рис. 5.7. Результат розрахунку згинальних моментів в трюмному шпангоуті

Результати розрахунку розмахів згинальних моментів від згину балки-трюмного шпангоута M_6 , кН·м, представлені в табл. 5.3 для РС «судно в повному вантажі» та «судно в баласті». В таблиці також представлено результати розрахунку нормальних напружень σ_z , МПа, обумовлених згином балки.

Таблиця 5.3. Розрахунок розмахів нормальних напружень, обумовлених згином балки

Номер відсіку	Для РС I (M_6) _в , кН·м	Для РС III (M_6) _б , кН·м	Для РС I (σ_3) _в , МПа	Для РС III (σ_3) _б , МПа
2	34,43	38,32	36,45	40,57

Зведені результати розрахунків розмахів напружень від згину перекриття σ_2 та згину балки σ_3 представлені в табл. 5.4 та 5.5. В таблицях також представлені величини розмахів еквівалентних номінальних напружень σ_p^{Σ} для РС «судно в повному вантажі» та «судно в баласті».

Таблиця 5.4. Зведені результати на основі двовимірних моделей. РС «судно в повному вантажі»

Номер відсіку	Відстань від НП x , м	(σ_2) _в , МПа	(σ_3) _в , МПа	Для РС I (σ_p^{Σ}) _в , МПа
2	34,750	45,68	36,45	82,13

Таблиця 5.5. Зведені результати на основі двовимірних моделей. РС «судно в баласті»

Номер відсіку	Відстань від НП x , м	(σ_2) _в , МПа	(σ_3) _в , МПа	Для РС III (σ_p^{Σ}) _б , МПа
2	34,750	51,36	40,57	91,93

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

При визначенні еквівалентних експлуатаційних напружень розглядалось 2 основних розрахункових стани: I – “судно у повному вантажі”; II – “судно в баласті”.

Розмахи розрахункових тисків на частини відсіку були розраховані відповідно до норм міцності морських суден із експлуатаційною забезпеченістю.

Скінченно-елементна модель відсіку разом із прикладеними навантаженнями на в'язі представлена на рис. 5.8 для розрахункового стану “судно у повному вантажі” та для “судно в баласті” на рис. 5.9

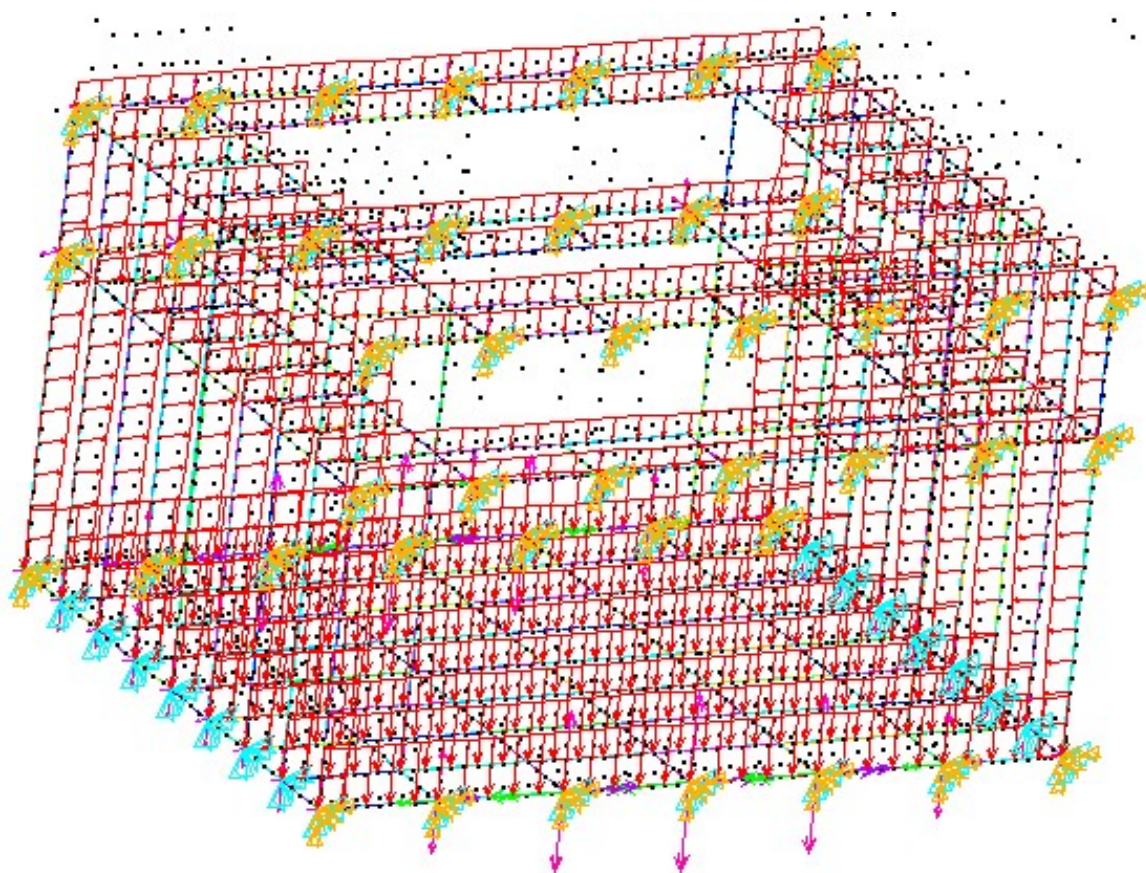


Рис. 5.8. Скінченно-елементна модель відсіку разом із прикладеними навантаженнями для розрахункового стану “судно у повному вантажі”

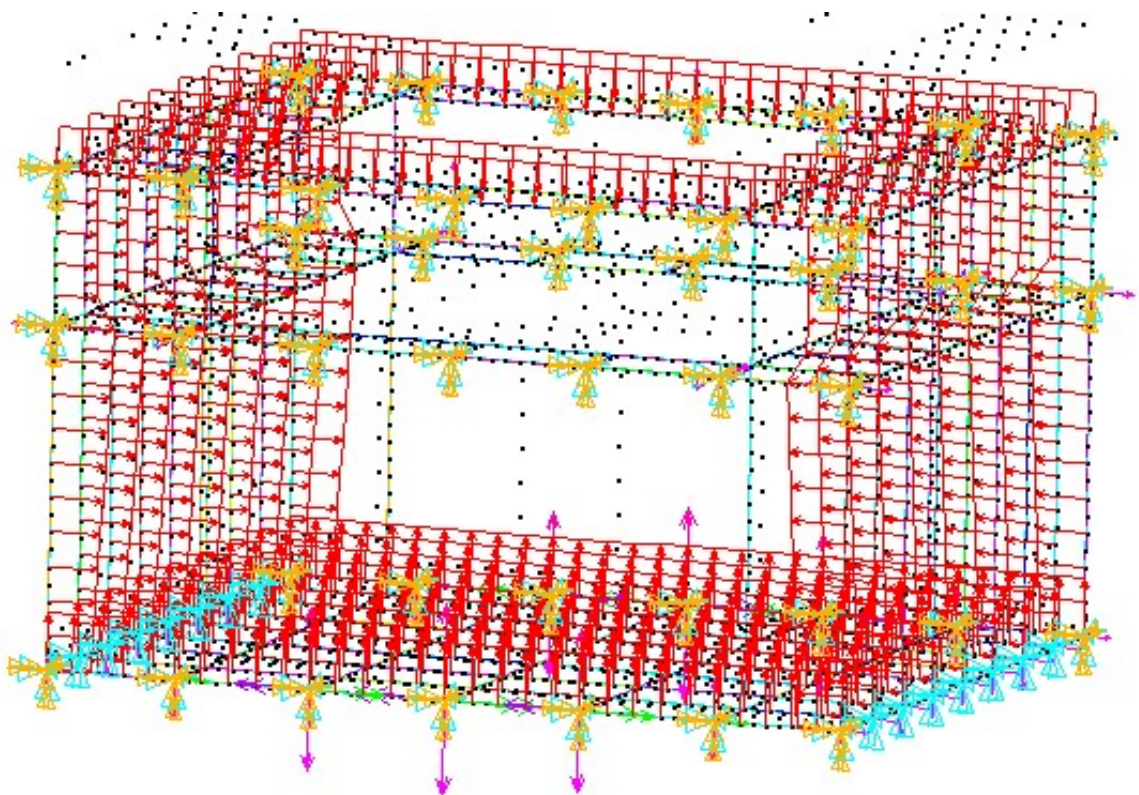


Рис. 5.9. Скінченно-елементна модель відсіку разом із прикладеними навантаженнями для розрахункового стану “судно в баласті”

Епюри згинальних моментів, що діють у в'язях відсіку, представлені на рис. 5.10 – 5.11 для двох розрахункових станів, що розглядались.

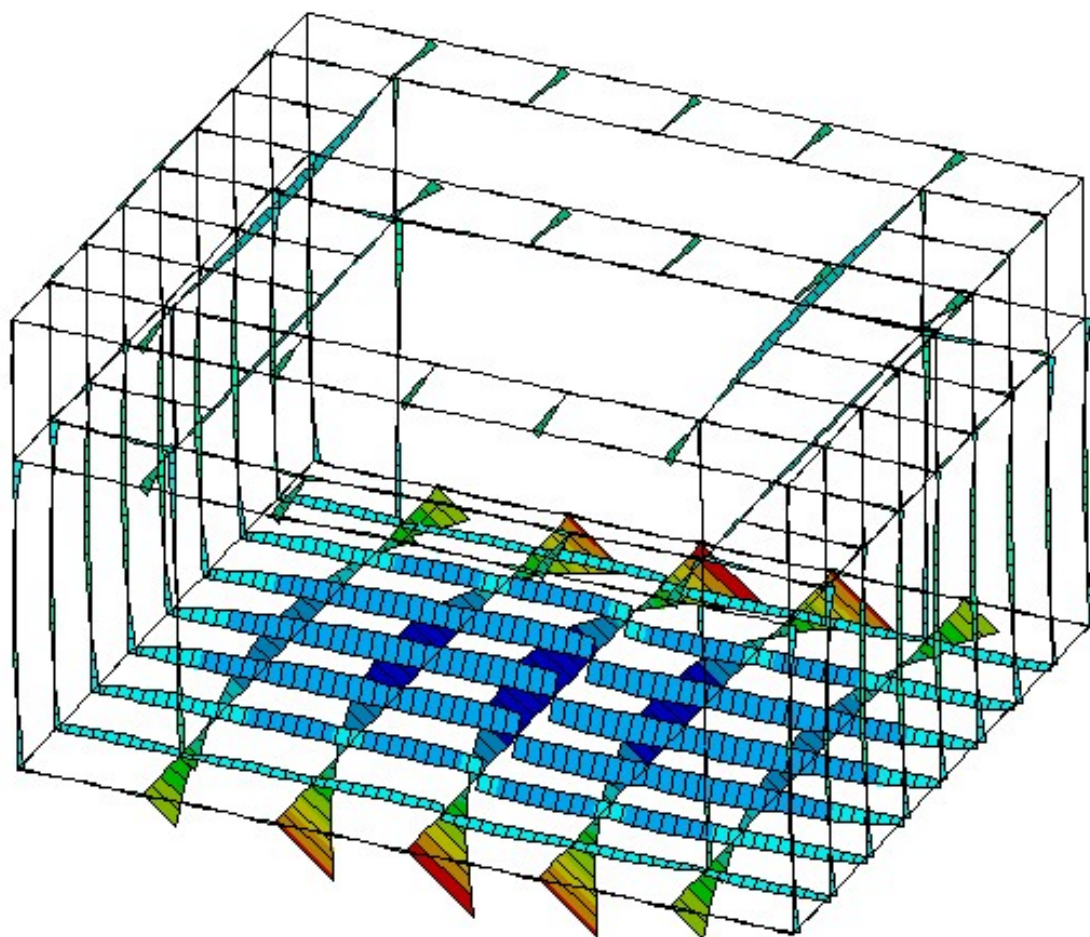


Рис. 5.10. Епюра згинальних моментів у в'язях відсіку для розрахункового стану “судно у повному вантажі ”

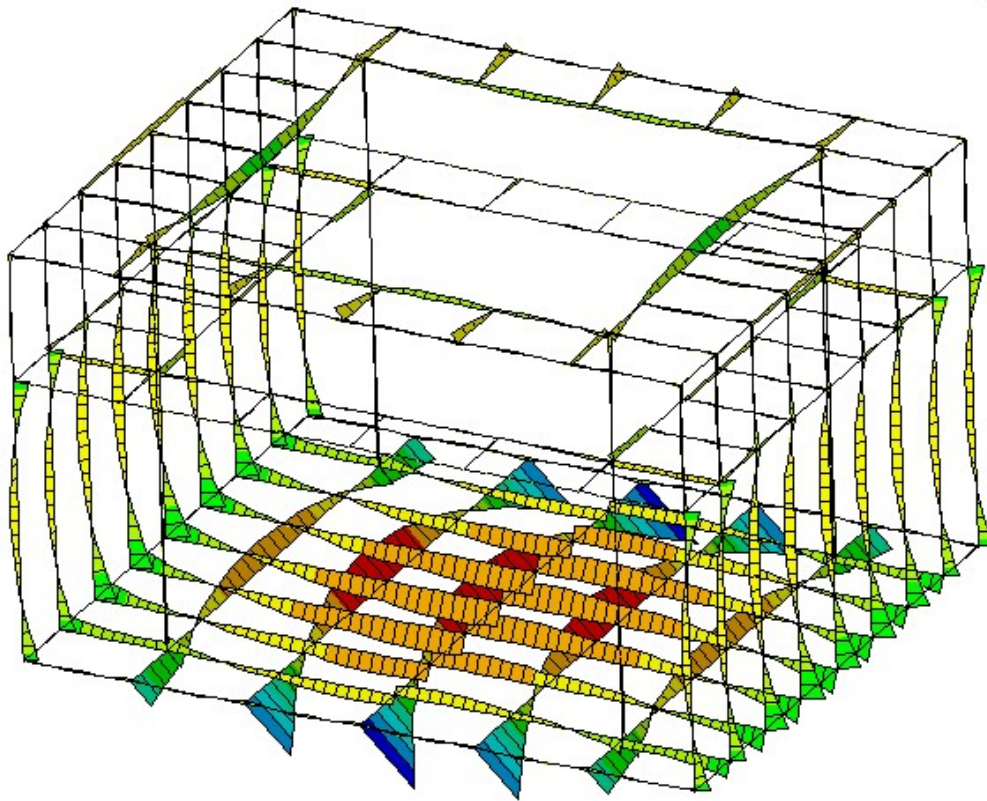


Рис. 5.11. Епюра згинальних моментів у в'язях відсіку для розрахункового стану “судно в баласті”

Для визначення розмахів напружень від згину балки-шпангоута в трюмі застосовувався також скінченно-елементний аналіз.

Розрахункова схема трюмного шпангоута-балки представлена на рис. 5.5.

Скінченно-елементна модель шпангота для РС «судно в повному вантажі» представлена на рис. 5.6. Епюра згинальних моментів – на рис. 5.7.

Результати розрахунків розмахів згинальних моментів для місця з'єднання шпангоута та подвійного дна середнього шпангоуту відсіку представлені в табл. 5.2.

Табл. 5.2. Результати розрахунків розмахів згинальних моментів для вузла з'єднання шпангоуту та подвійного дна

Розрахунковий стан	ΔM_{zg} від згину перекриття, кН*м	ΔM_{zg} від згину балки, кН*м
“судно в повному вантажі”	57,814	34,45
“судно в баласті”	133,67	38,33

Результати розрахунку розмахів відповідних номінальних напружень від згину перекриття та балки представлені в табл. 5.3.

Табл. 5.3. Результати розрахунків розмахів номінальних напружень для вузла з'єднання шпангоуту та подвійного дна

Розрахунковий стан	$\Delta \sigma_2$ від згину перекриття, кН*м	$\Delta \sigma_3$ від згину балки, МПа
“судно в повному вантажі”	18,54	36,48
“судно в баласті”	42,86	40,58

Результати визначення еквівалентних експлуатаційних напружень σ_p^Σ на базі наведених на рис. 5.8, 5.9 3-вимірних стержньових моделей відсіку представлені у табл. 5.4. У цій таблиці також наведені для порівняння результати, отримані з використанням плоских стержньових моделей, з табл. 5.4 та 5.5.

Табл. 5.4. Результати застосування тривірних та тривимірних скінченно-елементних моделей для розрахунку еквівалентних експлуатаційних напружень

Розрахункова величина	Тип моделі, що застосовувався	РС “судно у повному вантажі”	РС “судно в баласті”
Еквівалентне напруження із зазпеченістю $10^{-5} \sigma_p \Sigma$, МПа	Тривимірна	55,01	83,45
Еквівалентне напруження із зазпеченістю $10^{-5} \sigma_p \Sigma$, МПа	Плоска	82,13	91,93

5.3. Висновки з розділу 5

- Визначено розмахи сумарних еквівалентних напружень із експлуатаційною забезпеченістю, що діють на суднокорпусний вузол перетину шпангоуту із другим дном в районі середини другого вісіку судна. Розрахунки виконувались з використанням плоскої стержньової моделі суднового перекриття та з використанням тривірної стержньової моделі відсіку.
- Порівняно результати розрахунків. Встановлено, що результати, отримані із плоскою стержньовою скінченно-елементною моделлю, перевищують другі. Таким чином, застосування ізольованих від корпусу судна плоских моделей судових перекриттів до визначення еквівалентних експлуатаційних напружень у суднокорпусних

конструкціях призводить до завищених результатів. Таким чином, при використанні таких напружень до розрахунку на втому, результати будуть із запасом в безпечний бік.

ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд проблеми визначення змінних експлуатаційних напружень у констурктивних вузлах корпусів суден, на основі яких виконується оцінка втомної довговічності.
2. Виконано диферентовку судна з використанням програмного забезпечення кафедри.
3. Встановлено величини розмахів місцевих навантажень на корпусні конструкції.
4. Встановлено, що доцільно застосовувати стержньові елементи для побудови 2-D та 3-D моделей й визначення напружень. Наведено основні залежності методу скінченних елементів.
5. Визначено розмахи сумарних еквівалентних напружень із експлуатаційною забезпеченістю, що діють на суднокорпусний вузол перетину шпангоуту із другим дном в районі середини другого вісіку судна. Розрахунки виконувались з використанням плоскої стержньової моделі суднового перекриття та з використанням тривірної стержньової моделі відсіку.
6. Порівняно результати розрахунків. Встановлено, що результати, отримані із плоскою стержньовою скінченно-елементною моделлю, перевищують другі. Таким чином, застосування ізольованих від корпусу судна плоских моделей судових перекриттів до визначення еквівалентних експлуатаційних напружень у суднокорпусних конструкціях призводить до завищених результатів. Таким чином, при використанні таких напружень до розрахунку на втому, результати будуть із запасом в безпечний бік.

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. Основы теории пружности, строительной механики, прочности, 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.
9. IACS Recommendation No. 56. Fatigue assessment of ship structures. July 1999.

ДОДАТОК А

Результати диферентовки суховантажного судна у програмі LS SMK

Результати диферентовки, расчёт диференциальных моментов
КОРРЕКТА СДАННА НА ТЕХОС ВОДЕ

С С Х О А Н Ф Е А А Н Н Ф Е

Slauta 6116

éáqz;Г

9

ВІСНОВА СДАННА .1390E+03 М

ВІСНОВА ШОРТА .1220E+02 М

МАСШТАБ .1900E+02

НАДРІЗКА АО УААУЕМ (Т) N 1

.2100E+03	.2100E+03	.6980E+03	.6980E+03	.1014E+04
.1014E+04	.1017E+04	.1017E+04	.1043E+04	.1043E+04
.1143E+04	.1143E+04	.6130E+03	.6130E+03	.6260E+03
.6260E+03	.7640E+03	.7640E+03	.5270E+03	.5270E+03

НАДРІЗКА АО УААУЕМ (Т) N 2

.2100E+03	.2100E+03	.6980E+03	.6980E+03	.9960E+03
.9960E+03	.9980E+03	.9980E+03	.1024E+04	.1024E+04
.1124E+04	.1124E+04	.5680E+03	.5680E+03	.4970E+03
.4970E+03	.6960E+03	.6960E+03	.5160E+03	.5160E+03

НАДРІЗКА АО УААУЕМ (Т) N 3

.3040E+03	.3040E+03	.3960E+03	.3960E+03	.7120E+03
.7120E+03	.7340E+03	.7340E+03	.3320E+03	.3320E+03
.2340E+03	.2340E+03	.2600E+03	.2600E+03	.4970E+03
.4970E+03	.3300E+03	.3300E+03	.5480E+03	.5480E+03

РЕЗУЛЬТАТИ РАХУНКІВ

ВІСНОВА МЕТОДИКА D= .1531E+05 Т

КОРРЕКТА ШОРТА ТРАКТАТО XG=-.2388E+00 М

ОБ'ЄМНОЕ ВІСНОВА МЕТОДИКА= .1537E+05 Т

ШОРТА ВІСНОВА=-.2908E+00 М

ОБ'ЄМНОЕ АНТИРЕФЛЕКТОРЕ СЕІ (Т)

.0000E+00	.1448E+03	.1183E+03	.3889E+03	.4394E+03
.6184E+03	.6532E+03	.5790E+03	.4732E+03	.3854E+03
.2996E+03	.3187E+03	.3546E+03	-.1072E+03	-.5265E+03
-.8567E+03	-.1061E+04	-.9704E+03	-.6917E+03	-.4420E+03
.0000E+00				

ОБ'ЄМНОЕ АНТИРЕФЛЕКТОРЕ МОМЕНТОВ (Т*М)

.0000E+00	.4622E+03	.1335E+04	.3057E+04	.5894E+04
.9529E+04	.1391E+05	.1815E+05	.2176E+05	.2471E+05
.2705E+05	.2915E+05	.3145E+05	.3227E+05	.3003E+05
.2518E+05	.1847E+05	.1137E+05	.5558E+04	.1577E+04
.0000E+00				

ОСАДКА АО РАХУНКІВ БАТЕРІЙНОЕ (М)

.8650E+01	.8636E+01	.8622E+01	.8608E+01	.8594E+01
.8580E+01	.8566E+01	.8552E+01	.8538E+01	.8524E+01
.8510E+01	.8496E+01	.8482E+01	.8468E+01	.8454E+01
.8440E+01	.8426E+01	.8412E+01	.8398E+01	.8384E+01
.8370E+01				

ВІСНОВА МЕТОДИКА D= .1465E+05 Т

КОРРЕКТА ШОРТА ТРАКТАТО XG= .8964E+00 М

ОБ'ЄМНОЕ ВІСНОВА МЕТОДИКА= .1468E+05 Т

ШОРТА ВІСНОВА= .8592E+00 М

ОБ'ЄМНОЕ АНТИРЕФЛЕКТОРЕ СЕІ (Т)

.0000E+00	.1399E+03	.1063E+03	.3720E+03	.4210E+03
.5863E+03	.6144E+03	.5396E+03	.4398E+03	.3648E+03
.2983E+03	.3431E+03	.4114E+03	-.3710E+02	-.4365E+03
-.8249E+03	-.1087E+04	-.9971E+03	-.7281E+03	-.4467E+03
.0000E+00				

ОБ'ЄМНОЕ АНТИРЕФЛЕКТОРЕ МОМЕНТОВ (Т*М)

.0000E+00	.4582E+03	.1286E+04	.2920E+04	.5648E+04
.9121E+04	.1327E+05	.1725E+05	.2062E+05	.2339E+05
.2567E+05	.2787E+05	.3046E+05	.3174E+05	.3006E+05
.2565E+05	.1898E+05	.1171E+05	.5690E+04	.1580E+04
.0000E+00				

.8820E+01	.8757E+01	.8694E+01	.8631E+01	.8568E+01
.8505E+01	.8442E+01	.8379E+01	.8316E+01	.8253E+01
.8190E+01	.8127E+01	.8064E+01	.8001E+01	.7938E+01
.7875E+01	.7812E+01	.7749E+01	.7686E+01	.7623E+01
.7560E+01				

BOäOêÇMEÖEHêE D= .8694E+04 T

KOOPäêHATA ûEHTPA TfäECTê XG= .1377E+01 M

OüLEMHOE BOäOêÇMEÖEHêE= .8685E+04 T

ûEHTP BEIêùEHç = .1335E+01 M

OPäêHATç ÄEPPEPÊçBAMÖEë CêIç (T)

.0000E+00	.2657E+03	.4216E+03	.5447E+03	.7390E+03
.1120E+04	.1182E+04	.1187E+04	.1175E+04	.7670E+03
.3750E+03	-.9675E+02	-.5371E+03	-.9046E+03	-.1221E+04
-.1225E+04	-.1132E+04	-.1107E+04	-.9742E+03	-.5223E+03
.0000E+00				

OPäêHATç êçäêüAMÖêX MOMEHTOB (T*M)

.0000E+00	.9038E+03	.3273E+04	.6611E+04	.1105E+05
.1749E+05	.2547E+05	.3368E+05	.4187E+05	.4860E+05
.5255E+05	.5350E+05	.5127E+05	.4624E+05	.3884E+05
.3032E+05	.2211E+05	.1431E+05	.7054E+04	.1834E+04
.0000E+00				

OCAäKê ÄO PACùETHÖê BATEPIêEHê (M)

.6620E+01	.6503E+01	.6386E+01	.6269E+01	.6152E+01
.6035E+01	.5918E+01	.5801E+01	.5684E+01	.5567E+01
.5450E+01	.5333E+01	.5216E+01	.5099E+01	.4982E+01
.4865E+01	.4748E+01	.4631E+01	.4514E+01	.4397E+01
.4280E+01				
