

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

О.Є. Лугінін, О.М. Дудченко, С.В. Терлич

РОЗРАХУНОК ЗАГАЛЬНОЇ ТА МІСЦЕВОЇ МІЦНОСТІ КОРПУСУ СУДНА

Методичні вказівки
до курсового і дипломного проєктування
з дисципліни «Будівельна механіка корабля»
2-ге видання

Рекомендовано методичною радою НУК

Миколаїв 2022

УДК 629.5:539.4

Автори: О.Є. Лугінін, канд. техн. наук, професор НУК;
О.М. Дудченко, канд. техн. наук, професор НУК;
С.В. Терлич, канд. техн. наук.

Розрахунок загальної та місцевої міцності корпусу судна: методичні вказівки до курсового і дипломного проектування з дисципліни «Будівельна механіка корабля»; 2-е видання. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С. 2022. – 69 с.

Рецензент: О.В. Щедролосєв, д-р. техн. наук, професор

Рекомендовано методичною радою Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Методичні вказівки включають практичні рекомендації до самостійної роботи студентів з виконання розрахунків поздовжньої загальної та місцевої міцності корпусів суден традиційних типів за даними Регістру судноплавства України. Наводиться опис перевірки загальної міцності суден нових конструктивних типів (у тому числі удосконалених існуючих типів) за Нормами міцності.

Приведені дані з перевірки місцевої міцності та стійкості елементів днищевих перекриттів суден: ребер жорсткості та днищових пластин.

Призначені для виконання здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти курсової роботи з дисципліни «Будівельна механіка корабля» і кваліфікаційної роботи бакалавра за спеціальністю 135 «Суднобудування» з освітніх програм «Кораблі та океанотехніка», «Суднокорпусобудування», «Судноремонт та технічне обслуговування флоту».

Розділ 1 підготовлено О.Є. Лугініним, розділи 2, 3 – О.Є. Лугініним, О.М. Дудченко та С.В. Терlichem.

УДК 629.5:539.4

© О.Є. Лугінін, О.М. Дудченко С.В. Терлич, 2022
©Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СУДНА.....	7
1.1 Головні проблеми будівельної механіки корабля.....	7
1.2 Характеристики зовнішніх сил, які діють на судно.....	9
1.3 Критерії міцності судна.....	11
2 ПЕРЕВІРКА ЗАГАЛЬНОЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ МІЦНОСТІ КОРПУСУ СУДНА.....	13
2.1 Зміст курсової роботи.....	13
2.1.1 Загальні рекомендації до виконання курсової роботи.....	13
2.1.2 Розрахунок згинальних моментів та зрізуючих сил корпусу судна на тихій воді та хвилеутворенні.....	14
2.1.2.1 Вибір розрахункових станів навантаження судна, складання та обчислення таблиць вагового навантаження та площ шпангоутів.....	14
2.1.2.2 Розрахунок згинальних моментів та зрізуючих сил корпусу судна на тихій воді.....	19
2.1.2.3 Розрахунок хвильових та ударних згинальних моментів і зрізуючих сил корпусу судна за Правилами Регістра судноплавства України.....	30
2.1.3 Розрахунок еквівалентного бруса.....	33
2.1.3.1 Складання розрахункового перерізу корпусу судна. Обчислення геометричних характеристик еквівалентного бруса в першому наближенні.....	33
2.1.3.2 Розрахунок стійкості перекриття верхньої палуби.....	36
2.1.3.3 Розрахунок стійкості поздовжнього набору та пластин, що входять до еквівалентного бруса.....	40
2.1.4 Перевірка загальної міцності корпусу судна за Правилами Регістру судноплавства України.....	43
2.1.4.1 Розрахунки мінімальних значень моменту опору та моменту інерції міделевого перерізу корпусу судна.....	43
2.1.4.2 Перевірка загальної міцності корпусу традиційних типів суден...	44
2.2 Загальна характеристика обґрунтування загальної міцності корпусів суден нових типів за Нормами міцності.....	44
3 РОЗРАХУНОК МІСЦЕВОЇ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДНИЩЕВОГО ПЕРЕКРИТТЯ СУДНА.....	53
3.1 Навантаження від дії води.....	53
3.2 Перевірка місцевої міцності днищових ребер	

	жорсткості.....	54
3.3	Перевірка місцевої міцності днищової пластини.....	55
	Список літератури.....	58
	ДОДАТКИ.....	59
	Додаток А – Вихідні дані для перевірки загальної міцності корпусу судна в курсовій роботі.....	60
	Додаток В – Вихідні дані для розрахунку на ПК загального згину корпусу судна на тихій воді та приклад розрахунку за програмою для ПК LS-17.....	64

ВСТУП

Курсова робота з дисципліни «Будівельна механіка корабля» в основному завершує вивчення циклу міцнісних дисциплін і має за мету дати здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти можливість застосувати набуті знання для розрахунків міцності конкретного судна та його конструктивних елементів. Потім в дипломному проєктуванні реалізується досвід виконання поширених міцнісних розрахунків для судна в цілому та його складових частин.

Успішне виконання курсової роботи припускає, що студент активно володіє не тільки знаннями «Опору матеріалів», «Деталей машин», «Конструкції корпусу корабля», «Теорії корабля», «Динаміки корабля», «Основ проєктування суден» та іншими спеціальними дисциплінами кораблебудівного циклу, але й може приймати і реалізовувати міцнісні рішення за розділами вивчаємої дисципліни «Будівельна механіка корабля».

При самостійній роботі з курсового проєктування студенту необхідно досконально вивчити і з'ясувати наступне:

- умови взаємодії судна, його конструкцій та елементів із зовнішнім середовищем (повітрям, водою) та вантажами в умовах тихої води та хвилеутворенні;
- умови, при яких можлива руйнація або втрата працездатності конструкцій та їх елементів;
- принципи побудови розрахункових схем реальних конструкцій;
- принципи нормування міцності судна та його складових частин.

Курсова робота складається з двох частин: розрахунку поздовжньої загальної міцності корпусу судна і розрахунку місцевої міцності елементів днищового перекриття (ребер жорсткості та пластин).

По узгодженню з керівником курсової роботи в розділі місцевої міцності можуть бути розглянуті дослідницькі питання, наприклад, розрахунок місцевої міцності судових перекриттів з використанням ПК [11].

В дипломному проєктуванні при виконанні класифікаційної роботи можуть бути виконані поширені розділи курсової роботи із загальної та місцевої міцності суден, морських споруд та інших конструкцій корпусу судна.

В методичних вказівках оновлені та поширені рекомендації [3, 4], яким надано сучасну форму з оцінки міцності судна та його елементів. У навчальному виданні дана спрощена форма перевірки загальної міцності суден традиційних типів на основі Правил Регістру судноплавства України [1, 3], що використовується в сучасній практиці проєктування суден. В той же час, наведена методика перевірки загальної міцності нових типів суден (в тому числі удосконалення існуючих типів) з використанням відповідних критеріїв міцності [2, 4, 6].

Методичні вказівки підготовані викладачами кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова к.т.н., професором НУК Лугініним Олегом Євгеновичем, к.т.н., професором НУК Дудченко Олегом Миколайовичем та к.т.н., доцентом Терличем Станіславом Володимировичем. Автори будуть вдячні за зауваження та пропозиції у їх подальшій методичній роботі.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СУДНА

1.1 Головні проблеми будівельної механіки корабля

Однією з найважливіших вимог до суден при проектуванні, спусканні зі стапелю, подальшій експлуатації та при проведенні докових ремонтних робіт є забезпечення їм *міцності корпусу*.

Міцність – це здатність судна як споруди, його конструкцій та елементів протидіяти зовнішньому впливу без порушення цілісності або недопустимих змін форми на протязі заданого терміну дії при визначених умовах експлуатації та ступенем гарантії.

Проблема забезпечення міцності суден (у широкому розумінні, тобто й жорсткості конструкцій та їх елементів, їх стійкості при дії стискаючих зусиль та інше) є чи не найбільш важливою проблемою будівельної механіки корабля. Тут слід згадати прізвище видатного вченого, засновника науки будівельної механіки корабля професора *Бубнова Івана Григоровича* (1872-1919 рр.), який присвятив вивченню та дослідженню проблеми міцності суден величезну увагу. Значний внесок у розв'язанні даної проблеми внесли також академік *Шиманський Юліан Олександрович* (1883-1962 рр.), професори *Папкович Петро Федорович* (1887-1946 рр.), *Курдюмов Олександр Олександрович* (1911-1968 рр.) та інші. Із сучасників слід сказати прізвища професорів *Бойцова Геннадія Володимировича* (1931-2013 рр.), *Короткіна Якова Ісаєвича* (1918 -1993 рр.), *Козлякова Віталія Васильовича* (1928-2017 рр.), *Максімаджи Олександра Ісаковича* (1923-2002 рр.), *Постнова Валерія Олександровича* (1927-2008 рр.), *Сулова Віталія Павловича* (1922-2020 рр.), *Кочанова Юрія Петровича* (1937 р.н.) та інших, зусиллями яких було розроблено сучасні методи оцінки міцності суден та їх складових частин.

Для того щоб судно при проектуванні було *міцним*, необхідно розглянути і вирішити *три основні проблеми* будівельної механіки корабля:

1) *проблему зовнішніх сил* – які зусилля від зовнішнього середовища (води, повітря, льоду, вантажів та інше) можуть діяти на судно та його конструкції при експлуатації і які з них слід приймати в якості розрахункових;

2) *проблему внутрішніх сил* – які напруження та деформації виникають у в'язях корпусу судна під дією сукупності зовнішніх сил в період експлуатації;

3) *проблема оцінки і нормування міцності корпусу судна та його конструкцій* (або за колишньою назвою – *проблема допустимих напружень*) – які напруження та деформації можуть бути допущені у в'язях на протязі заданого терміну експлуатації без загрози для міцності.

Традиційно при проведенні практичних розрахунків прийнято окремо розглядати загальну та місцеву міцність судна.

Загальна міцність – це міцність всього корпусу судна, який представляється для традиційних типів суден у вигляді непризматичного стержня під дією складної системи зовнішніх сил.

Місцева міцність – це міцність типових простих конструкцій та їх елементів (рам, перекриттів, балок, пластин), які можна умовно виділити із корпусу судна під дією відповідних зовнішніх сил (гідростатичний або гідродинамічний тиск води, дія вантажів, льоду та інше).

Розподіл на загальну та місцеву міцність для традиційних типів суден є умовним, так як всі конструкції взаємопов'язані. Однак, це значно спрощує розрахунки і, як показує досвід, дає практично сприятні результати.

Необхідно зазначити, що в теперішній час в умовах проектування нових типів суден з використанням складних комп'ютерних комплексів на основі чисельних методів розрахунку, корпус судна представляється складною оболонковою конструкцією, де враховується взаємодія корпусу з його конструкціями та їх елементами, тобто не відокремлюються поняття загальної та місцевої міцності.

1.2 Характеристики зовнішніх сил, які діють на судно

На корпус судна в процесі експлуатації діє складна система змінних за часом сил і головна серед них відображає взаємодію судна з водою. З урахуванням швидкої зміни цих навантажень та їх фізичної природи таку взаємодію можна розподілити на три категорії.

До першої категорії відноситься навантаження на судно на тихій воді. У відсутності хвилеутворення з боку морських хвиль на корпус судна діють тільки *сили ваги* від мас, розташованих на судні (власної маси корпусу судна з усіма механізмами та пристроями, маси вантажу чи баласту, маси запасів та інше) та *сили підтримання* від заборотної води. Швидкість зміни цих сил на тихій воді достатньо мала і тому їх можна розглядати як статичні. На тихій воді корпус судна сприймає дію сил тяжіння вагової водотоннажності Δ інтенсивністю q_1 та гідростатичних сил підтримки з боку води γV (γ – питома вага води, кН/м^3 ; V – об’ємна водотоннажність, м^3) інтенсивністю q_2 . Вони в цілому статично еквівалентні між собою за законами плавучості

$$\begin{aligned}\Delta &= \gamma \cdot V; \\ x_g &= x_c,\end{aligned}\tag{1}$$

але мають різні закони розподілення за довжиною судна (рис. 1; x_g – абсциса центру ваги, м; x_c – абсциса центру величини, м), і загальний згин корпусу визначається їх різницею, що призводить до прогину судна (a), або його перегину (b).

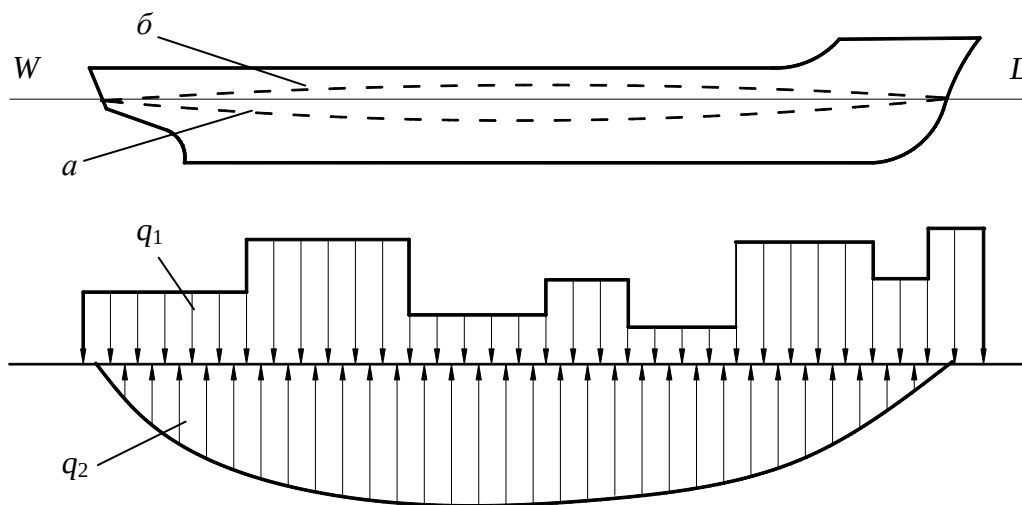


Рис. 1 – Можливі варіанти згинання корпусу на тихій воді

На рис.1 позначено: *a* – прогин судна; *b* – перегин судна.

До *другої категорії* навантаження на корпус відносяться *сили впливу кінематичних умов* акваторій, де експлуатуються судна. Це, перш за все, морське та океанське *хвильеутворення*, яке викликає хитавицю судна і змінний гідродинамічний тиск на його корпус з появою таких сил: *сили інерції*, пов'язані з прискореннями при хитавиці мас корпусних конструкцій, механізмів і вантажу; *головна та дифракційна частини* хвильових сил; *інерційно-демпферуючі сили* від хитавиці та ударні навантаження корпусу від слемінгу.

Величин і характер зміни цих сил визначається головним чином параметрами морського хвильеутворення (висота, довжина, форма хвиль), які мають випадковий характер і їх можна оцінювати за допомогою методів теорії ймовірностей. Такі сили мають знаковмінний характер з періодом зміни, близьким до періоду хвиль.

До *третьої категорії* можна віднести *навантаження*, яке виникає ще в *процесі побудови та ремонту корпусу судна* (наприклад, при транспортуванні блоків і секцій), при спусканні зі стапелю, постановці в док, аварійне навантаження при затоплюванні відсіків.

Аналізуючи умови взаємодії корпусу судна з хвилями, можна встановити, що хвильовий тиск разом з інерційними зусиллями та силами опору води може визвати появу в перерізах корпусу зрізуючих сил N_w та згинальних моментів M_w як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах, скручуючих моментів M_{ws} . Для традиційних типів суден N_w , M_w , M_{ws} в горизонтальній площині і скручуванні відносно малі і не враховуються.

Окрім того, у відповідних умовах хвильеутворення і ходу судна M_{ws} при хитавиці за рахунок оголення днища носової частини корпусу з наступним його швидким зануренням у зустрічну хвилю виникає удар носової частини об воду. Таке явище для суден на хвилях отримало назву “*слемінг*” (від англійського слова “to slam” – шльопати). Розрізняють *слемінг днищем*, коли удар відбувається безпосередньо оголеною частиною днища, та *слемінг*

*борт*ом, коли удар дещо більш м'який, відбувається розвалами надводною частиною борту судна. В умовах слемінгу виникають значні гідродинамічні зусилля ударного характеру, які сумісно з силами інерції мас призводять до появи ударних (динамічних) згинальних моментів.

Поздовжні сили, що викликають стискання поздовжніх в'язів корпусу і які є результатом роботи гребного гвинта і сил опору води руху судна, відносно малі і, як правило, до уваги не приймаються.

Таким чином, система діючих на корпус судна зовнішніх сил може бути класифікована за характером зміни за часом і характером їх дії.

За характером зміни за часом розділяють:

- статичні сили;
- статично-змінні сили;
- періодичні (знакозмінні) сили;
- динамічні та ударні сили.

За характером дії навантаження можуть бути:

- постійно діючі сили (сила на тихій воді, багато повторювальні хвильові сили із середнім рівнем інтенсивності та забезпеченістю $\sim 10^{-5}$);
- випадкові сили, що діють на конструкцію обмеженим числом разів (сили на тихій воді при найбільш небажаному розміщенню вантажів, екстремальні хвильові сили із забезпеченістю $\sim 10^{-8}$, сили від ударів хвиль).

1.3 Критерії міцності судна

Розрахунок зовнішніх навантажень судна у морі та внутрішніх зусиль і напружень у корпусі є необхідним, але недостатнім для вирішення проблем міцності суден в умовах експлуатації. Потрібно ще з'ясувати рівні навантажень чи зусиль є небезпечними і можуть привести до недопустимих деформацій і навіть руйнації конструкцій судна.

Накопичений досвід експлуатації суден, багаточисельні експериментальні та теоретичні дослідження дозволили прийти до висновку, що для оцінки міцності суднового корпусу та його конструкцій повинні враховуватися наступні *критерії*:

- критерій статичної граничної міцності;
- критерій експлуатаційної (втомної) міцності;
- критерій крихкої міцності.

Критерій статичної граничної міцності припускає, що при дії з найбільш небезпечної екстремальної сукупності навантажень судна небезпечні стани в корпусі пов'язані з досягненням границі плинності елементів конструкцій або з втратою їх стійкості. Так, порушення загальної міцності виникає в разі появи напружень, які дорівнюють або перевищують границю плинності за усім перерізом верхньої палуби, або при втраті стійкості основних несучих в'язів конструкцій, що може привести до руйнації корпусу і загибелі судна.

Виконання вимог щодо критерію граничної міцності визначається величиною найбільшого граничного навантаження, яке може виникнути в умовах плавання і ймовірність перевищення якого встановлено 10^{-8} . Останнє визначається геометричними характеристиками і жорсткістю конструкції, границею плинності.

Критерій експлуатаційної (втомної) міцності висуває вимоги до виключення втомних ушкоджень у вигляді втомних тріщин у концентраторів напружень, що зумовлене нестаціонарними циклічними змінами за часом експлуатаційних навантажень. Тому рівень номінальних напружень у в'язях корпусу при тривалій на протязі розрахункового терміну експлуатації дії навантажень середньої інтенсивності не повинен перевищувати значень з певною забезпеченістю 10^{-5} , при яких можлива поява і зростання втомних тріщин в умовах існування мікро- і макроконцентраторів напружень.

Виникнення втомної тріщини не виводить конструкцію із подальшої роботи, так як для розвитку тріщини необхідно достатньо значного часу, на протязі якого конструкція продовжує виконувати свої функції. Втомні тріщини за мірою їх виявлення можуть бути заварені при ремонті.

При раціональному конструктивному оформленні в'язів корпусу та якісному їх виготовленню рівень напруженості корпусу можна

регламентувати і він повинен бути таким, щоб поява і розповсюдження втомних тріщин не призводило до необхідності частого ремонту і до великих витрат на нього.

За *критерієм крихкої міцності* повинно бути забезпечено достатній опір можливості появи крихких тріщин в умовах низьких температур, ударних навантажень, концентрації напружень і пов'язаних з цим об'ємним напруженим станом елементів конструкції. Поява крихких тріщин може привести до їх швидкого розповсюдження і руйнування корпусу.

Раптове крихке руйнування повинно розглядатися як граничний стан для конструкції і не може бути допущено. Тому на даний час вимоги до критерію крихкої міцності на основі досвіду експлуатації суден враховується при виборі матеріалу корпусу з розвинутими пластичними якостями, розробки вимог до конструктивного оформлення вирізів та перервних в'язів, при розробці технології виготовлення і контролю за якістю продукції.

Таким чином, на даний час на сучасному рівні розвитку знань в області забезпечення міцності суден використовуються при їх нормуванні два критерії:

- критерій статичної граничної міцності;
- критерій експлуатаційної (втомної) міцності.

Основою для визначення нормативних величин, які входять до критеріїв міцності (коефіцієнти запасу міцності, допустимі напруження, граничні навантаження), є досвід побудови і успішної експлуатації суден традиційних і нових типів. Тому наведені у міцностних вимогах Регістру судноплавства України та в рекомендаціях з нормування міцності суден величини розрахункових навантажень, допустимих напружень і запасів міцності справедливі тільки при умові, що при проєктуванні та побудові суден будуть виконані необхідні вимоги до матеріалу, конструктивному оформленні вузлів і технологічному процесу виготовлення конструкцій, їх контролю якості.

2 ПЕРЕВІРКА ЗАГАЛЬНОЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ МІЦНОСТІ КОРПУСУ СУДНА

2.1 Зміст курсової роботи

2.1.1 Загальні рекомендації до виконання курсової роботи

Виконання курсової роботи проводиться по завданню, виданому викладачем, за відповідними етапами 1-4 (Додаток А).

Кожен етап оформлюється як самостійна частина роботи і представляється керівнику на перевірку у термін, визначений у бланку завдання. При наявності зауважень студент виправляє помилки і коментує їх при співбесіді з керівником.

На останньому четвертому етапі типові завдання курсової роботи (розрахунок місцевої міцності днищового ребра жорсткості та днищової пластини) може бути замінено керівником, наприклад, по розрахунку міцності одного з перекриттів судна [11].

Повністю виконану курсову роботу, яка містить бланк завдання, чотири етапи, вступ та висновки представляється до захисту з встановленням оцінки за національною шкалою та відповідною кількістю балів.

У вступі до курсової роботи повинні бути вказані:

- ціль роботи;
- загальні дані для судна (призначення, головні розміри, швидкість руху, матеріал корпусу, система набору і таке інше);
- перелік задач, які необхідно вирішити при виконанні курсової роботи;
- перелік нормативних документів для використання.

У висновках необхідно вказати:

- результати виконання етапів роботи;
- висновки про відповідність (невідповідність) судна та його конструкцій (елементів) вимогам Регістру або Нормам міцності;
- рекомендації щодо приведення конструкцій корпусу судна у відповідність щодо надійності конструкцій судна.

Для виконання розрахунків міцності здобувачам освіти рекомендуються серії суден різних типів – суховантажні судна, танкери, нафтонавалочники. Судна кожної серії мають геометрично подібну форму обводів і характеризуються теоретичним кресленням та масштабом Бонжана.

Вихідні дані:

- довжина судна, L , м;
- ширина судна, B , м;
- висота борту, D , м;
- швидкість ходу, V , вуз;
- водотоннажність в повному навантаженні з повними запасами, Δ , кН;
- схема загального розміщення і епюра ємності;
- таблиця розподілення вагового навантаження за 10 теоретичними шпаціями (у відносних величинах);
- проєкція «Корпус» теоретичного креслення;
- масштаб Бонжана;
- схема мідель-шпангоута і розміри в'язів корпусу.

2.1.2 Розрахунок згинальних моментів та зрізуючих сил корпусу судна на тихій воді та хвилеутворенні

2.1.2.1 Вибір розрахункових станів навантаження судна, складання та обчислення таблиць вагового навантаження та площ шпангоутів

Досвідом експлуатації суден встановлено, що найбільш *характерними станами навантаження* морських транспортних суден, які необхідно прийняти в курсовому проєктуванні ($s = 1-3$), є такі:

- судно у повному вантажу зі 100% запасів;
- судно у повному вантажу з 50% запасів;
- судно в баласті з 50% запасів.

В курсовій роботі таблиці вагового навантаження з трьома зазначеними станами здійснюється за 10 теоретичними шпаціями (в дипломному проєктуванні – за 20 теоретичними шпаціями).

В бланку завдання із загальним розміщенням судна та епюрою ємності задаються відносні коефіцієнти ваги за статтями навантаження: «Порожнє судно», «Вантаж», «Запаси» і «Баласт». Визначивши за цими коефіцієнтами і заданим ваговим навантаженням судна фактичне навантаження статей, проводиться розподіл статей за шпаціями.

В результаті за станами навантаження складаються три таблиці, де за теоретичними шпаціями $j = 1, \dots, 10$ (j – номер шпації) наводиться розклад навантаження за відповідними статтями. Наприклад, вигляд статей за s -м станом навантаження наступний (табл. 1):

Таблиця 1 – Розподіл навантаження для судна в повному вантажі зі 100% запасів

Статті навантаження	Шпація									
	10-9	9-8	8-7	7-6	6-5	5-4	4-3	3-2	2-1	1-0
Порожнє судно	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Вантаж	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Запаси	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Σ	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

За кожною статтею повинна виконуватися умова:

$$\sum_i P_i = \sum_{j=1}^{10} P_{ij}, \quad \text{кН}, \quad (1)$$

де P_i – навантаження на судно за i -ю статтею, кН;

P_{ij} – навантаження i -ї статті за j -ю шпацією, кН.

Розподіл навантаження за кожним станом ілюструється рисунком, наприклад (рис. 2).

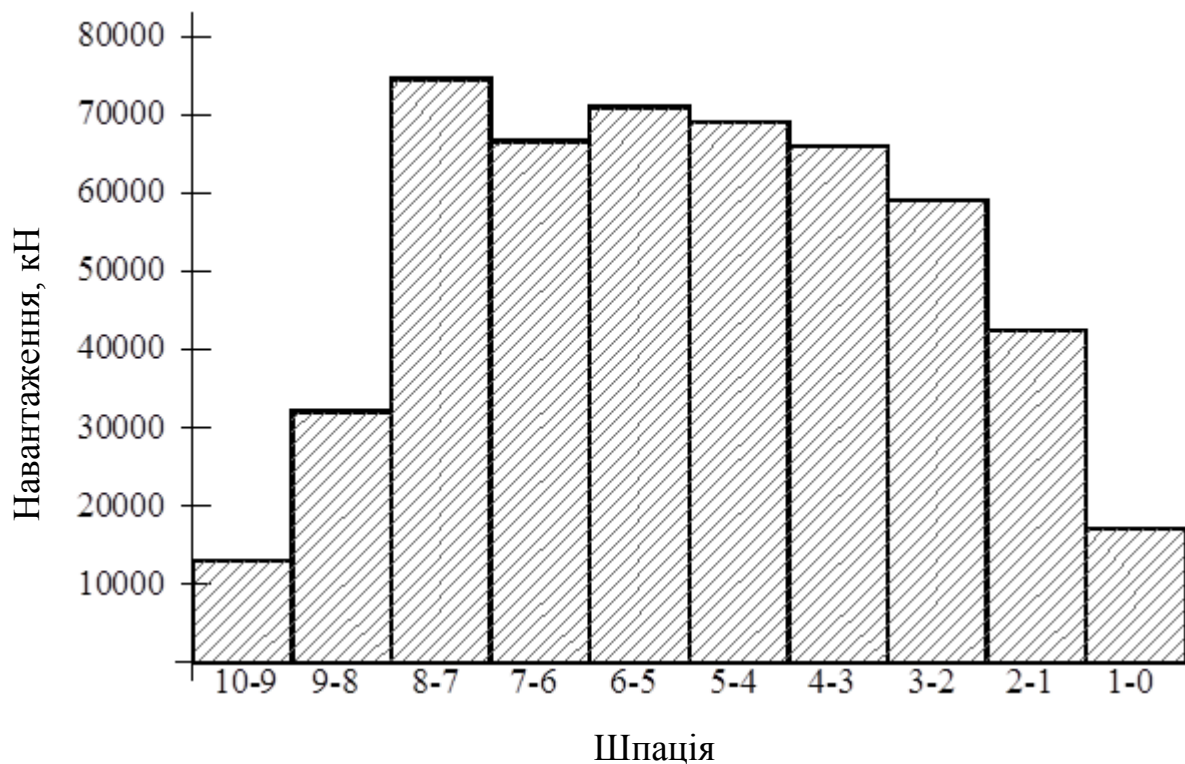


Рис. 2 – Вагова загрузка за станом навантаження (наприклад, при вантажі 100% з 50% запасів)

Площі теоретичних шпангоутів розглядаємого судна на рівнях ВП $\omega_j^{\text{ВП}}$ і КВЛ $\omega_j^{\text{КВЛ}}$ (j – номер теоретичного шпангоута) визначаються в такій послідовності:

а) по заданим значенням ширини судна B , висоти борта D та їх проєкціями теоретичного креслення встановлюються масштаби за висотою борта $M_D = \frac{D(\text{мм})}{D(\text{м})}$ і шириною судна $M_B = \frac{B(\text{мм})}{B(\text{м})}$;

$$M_D = \frac{D(\text{мм})}{D(\text{м})} \text{ і } M_B = \frac{B(\text{мм})}{B(\text{м})};$$

б) визначається площа мідель-шпангоута реального судна

$$\omega^{\text{ВП}} = B \cdot D - \frac{1}{2} a \cdot b, \text{ м}^2, \quad (2)$$

де $\left(\frac{1}{2} a \cdot b\right)$ – площа трикутника на рівні скули судна, яка еквівалента скруглінню обводів скули, м^2 ; $a = a(\text{мм}) \cdot M_{Bi}$, $b = b(\text{мм}) \cdot M_{Di}$ (рис. 3).

а)

б)

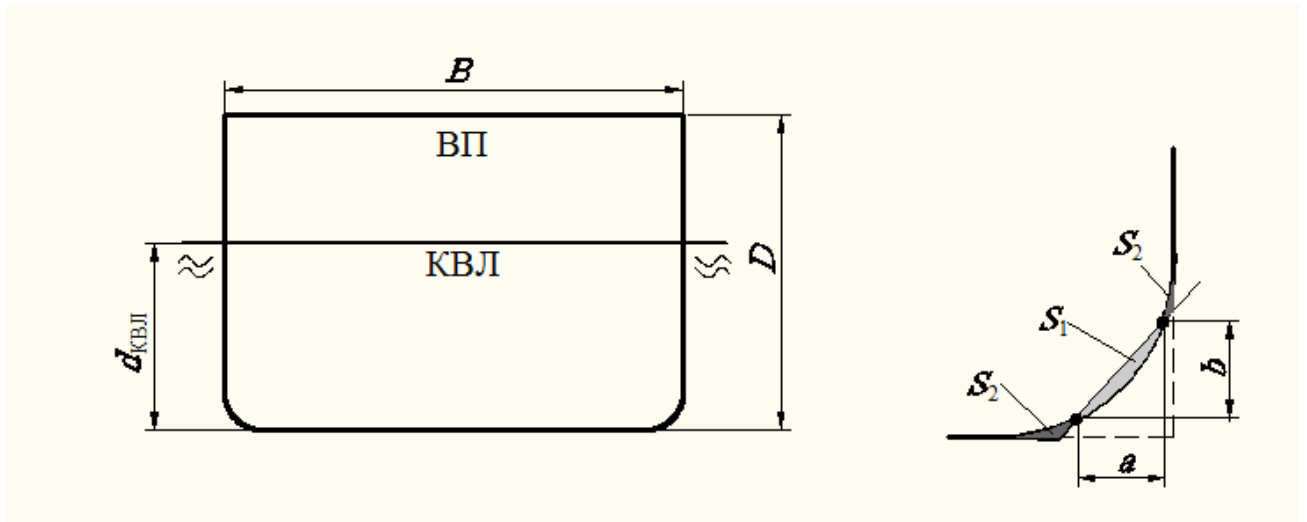


Рис. 3 – До розрахунку площ теоретичних шпангоутів в районі скули: a, b – сторони вписаного в скулу трикутника за умовою $S_1 = 2S_2$; $\left(\frac{1}{2} a \cdot b\right) = S_1 + 2S_2$

в) за масштабом Бонжана визначається його масштаб для середнього за довжиною судна шпангоута: при 10-и шпациях і 11 шпангоутів це 5-й шпангоут, який відповідає мідель-шпангоуту:

$$M_{\omega} = \frac{\omega^{\text{ВП}}(\text{м}^2)}{\omega^{\text{ВП}}(\text{мм})}, \quad (3)$$

де $\omega^{\text{ВП}}(\text{мм})$ – величина масштабу Бонжана у бланку завдання;

г) при наявності M_{ω} визначаються площі шпангоутів на рівнях ВП і КВЛ для реального судна:

$$\omega_j^{\text{ВП}} = C_j^{\text{ВП}} \cdot M_{\omega}, \quad \omega_j^{\text{КВЛ}} = C_j^{\text{КВЛ}} \cdot M_{\omega}, \quad (4)$$

де $C_j^{\text{ВП}}$ та $C_j^{\text{КВЛ}}$ – ординати за масштабом Бонжана на рівнях відповідно ВП і КВЛ;

д) наводяться в табличній формі площі шпангоутів (м^2) на рівнях ВП і КВЛ.

2.1.2.2 Розрахунок згинальних моментів та зрізуючих сил корпусу судна на тихій воді

Для визначення зазначених внутрішніх силових факторів використовується розрахункова програма LS 17 для персонального комп'ютера.

За вихідними даними, окрім головних розмірів та інших характеристик судна, задаються дані таблиць вагового навантаження судна та площ шпангоутів, які описані вище.

У кваліфікаційній роботі бакалавра для обраних варіантів вагового навантаження можуть бути використані східчасті криві за 20-ю теоретичними шпаціями способом професора О.О. Курдюмова [6].

Для побудови східчастої кривої необхідно мати у своєму розпорядженні величину вагової водотоннажності Δ та абсцису центру ваги x_g для заданого стану навантаження, що розглядається. Розрізняють два подання кривої за 20 теоретичними шпаціями: із циліндричною вставкою в межах середніх 8 шпацій (рис. 4, а) для суден з повними утвореннями при $C_B > 0,700$ (C_B – коефіцієнт загальної повноти судна); із циліндричною вставкою в межах 6 шпацій (рис. 4, б) для суден більш гострих утворень при $C_B \leq 0,700$.

Позначимо навантаження середніх теоретичних шпацій (рис. 1) як

$$P = m \frac{\Delta}{20}, \quad (5)$$

а в крайніх носових і кормових шпаціях

$$P_H = m_H \frac{\Delta}{20}; \quad P_K = m_K \frac{\Delta}{20}. \quad (6)$$

Прийнявши $m = 1,18$ [6], можна одержати вираз для коефіцієнтів m_H і m_K з умови рівності площі східчастої кривої і абсциси її центра ваги заданими величинами Δ та x_g :

а) для кривої на рис. 4, а:

$$m_H = 0,667 + 0,365\xi_K; \quad m_K = 0,667 - 0,365\xi_K;$$
$$\Delta_H = \frac{m - m_H}{6} \cdot \frac{\Delta}{20}; \quad \Delta_K = \frac{m - m_K}{6} \cdot \frac{\Delta}{20}. \quad (7)$$

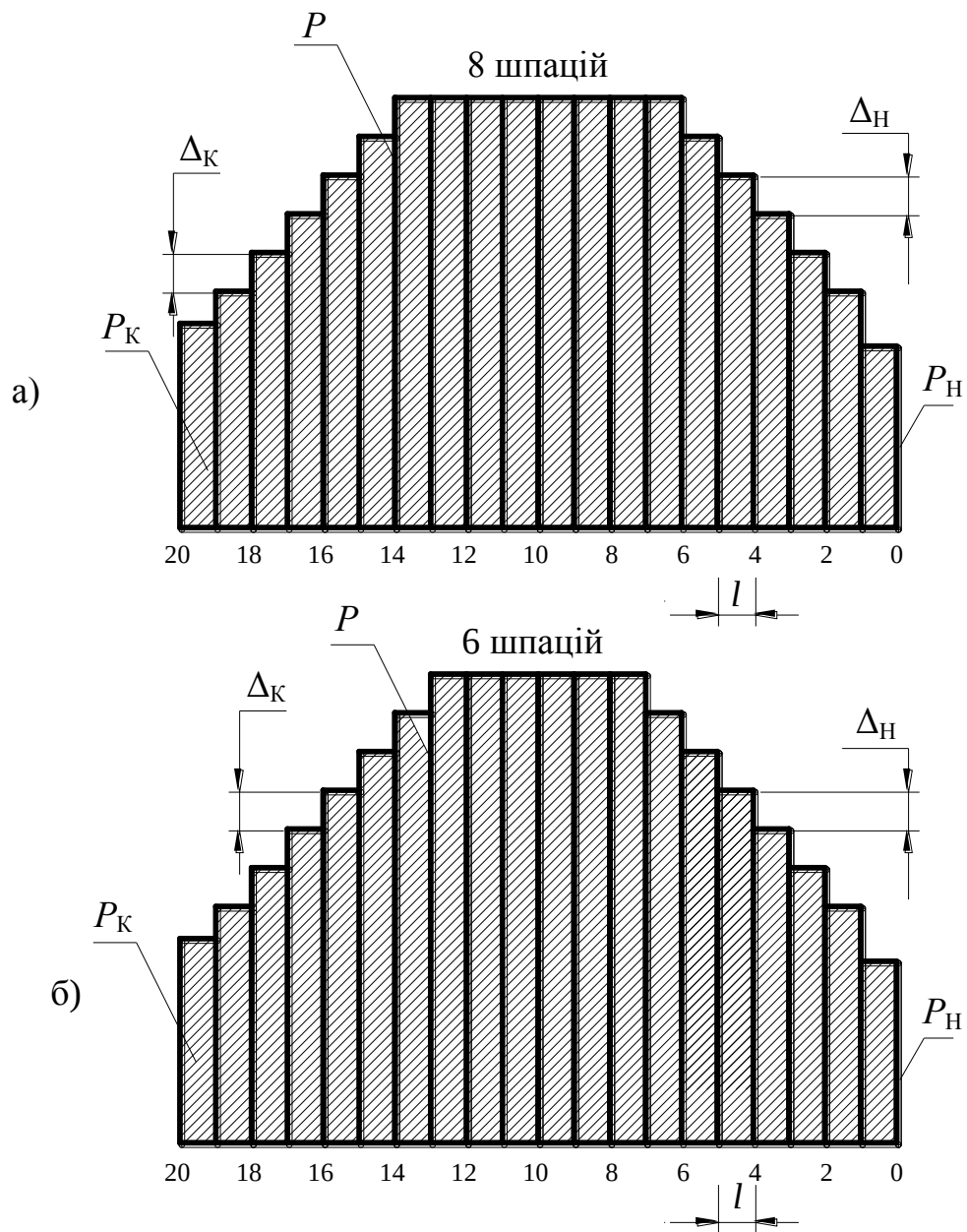


Рис. 4 – Варіанти розподілу вагового навантаження за шпациями

б) для кривої на рис. 4, б):

$$m_H = 0,730 + 0,333\xi_K;$$

$$m_K = 0,730 - 0,333\xi_K;$$

$$\Delta_H = \frac{m - m_H}{7} \cdot \frac{\Delta}{20}; \quad \Delta_K = \frac{m - m_K}{7} \cdot \frac{\Delta}{20}, \quad (8)$$

де $\xi_K = \frac{x_g}{l}$; $l = \frac{L}{20}$ – теоретична шпация, м; L – розрахункова довжина

судна, м; x_g – абсциса центру ваги, яка позитивна в ніс від міделя, м.

Припустимі відхилення Δ та x_g для східчастої кривої від вихідних даних не повинні перевищувати: для $\Delta - 0,5\%$; для $x_g - 0,001L$.

В алгоритмі для програми LS 17 за статтями навантаження вагова водотоннажність розраховується за формулою

$$\Delta = \sum_{j=1}^{n-1} P_j, \text{ кН}, \quad (9)$$

де P_j – навантаження в межах j -ї шпациї; n – число теоретичних шпангоутів ($n = 11$ – у курсовій роботі; $n = 21$ – при дипломному проєктуванні).

Абсциса центру ваги для розглядаємого варіанта навантаження визначається залежністю:

$$x_g = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} P_j x_j}{\Delta}, \text{ м}, \quad (10)$$

де x_j – координата центру ваги навантаження на шпацию, яка підліковується від міделевого перетину

$$x_j = \left(j - \frac{n}{2} \right) l, \text{ м}, \quad (11)$$

де l – шпация, м; $l = \frac{L}{n-1}$, j – параметр, що змінюється від 1 до n і означає номер теоретичного шпангоута при початку відліку від кормового перпендикуляра.

Об'ємна водотоннажність ∇ для заданої ватерлінії обчислюється за правилом трапецій (∇ – об'ємна водотоннажність V ; таке позначення ∇ прийнято за Правилами Регістру 2020 р [1]):

$$\nabla = l \left(\sum_{j=2}^{n-1} \omega_j + \frac{\omega_1 + \omega_n}{2} \right), \text{ м}^3, \quad (12)$$

де ω – площа зануреної частини j -го шпангоута, м^2 .

Абсциса центру величини розраховується з використанням того ж методу чисельного інтегрування:

$$x_c = \frac{1}{\nabla} \left(\sum_{j=2}^{n-1} \omega_j x'_j + \frac{\omega_n - \omega_1}{2} \cdot \frac{n-1}{2} l \right), \text{ м}, \quad (13)$$

де x'_j – координата j -го шпангоута, що підліковується від міделевого перерізу:

$$x'_j = l \left(j - 1 - \frac{n-1}{2} \right), \text{ м.} \quad (14)$$

Перед початком розрахунку розподілення згинальних моментів і зрізуючих сил за довжиною судна виконують його диферентування.

Нагадаємо, що *диферентуванням* називається процес знаходження положення рівнооб'ємної ватерлінії (ВЛ), при якій будуть виконуватись умови плавучості з урахуванням допустимих розбіжностей:

$$|\Delta - \gamma \nabla| \leq 0,005\Delta; \quad (15)$$

$$|x_C - x_g| \leq 0,001L \quad (16)$$

Алгоритм диферентування у наведених дослідженнях полягає у наступному [7]. Задається положення початкової ватерлінії (наприклад, осадка за КВЛ) та з прийнятим кроком за висотою борта вона піднімається (якщо $\Delta - \gamma \nabla \geq 0$), або опускається (якщо $\Delta - \gamma \nabla < 0$) до виконання умови (15). Після цього ватерлінія починає повертатись від горизонтального положення відносно міделевого перерізу, збільшуючи осідання в носу судна (при $x_C - x_g \leq 0$), або зменшуючи його (при $x_C - x_g > 0$) до виконання умови (16).

В загальному випадку похила ватерлінія (судно має диферент осідання на j -му теоретичному шпангоуті) може бути обчислена за залежністю

$$d_j = d_H + \frac{n-j}{n-1} (d_K - d_H), \quad (17)$$

де d_H – осідання судна носом, м; d_K – осідання судна кормою, м.

Слід зауважити, що навіть при автоматизованому виконанні диферентування судна на ПК виникає необхідність задання великого обсягу масивів площ шпангоутів за масштабом Бонжана для усіх задаваних ватерліній. Тому обсяг вихідних даних за масштабом Бонжана може бути значно зменшений, якщо апроксимувати лінії шпангоутів двома похилими лініями вище та нижче КВЛ [8] (пунктирні лінії на рис. 5).

Апроксимаційні прямі мають загальні точки з фактичною кривою площ шпангоутів на рівнях верхньої палуби (ВП), конструктивної ватерлінії (КВЛ) та основної площини (ОП). Дослідження вказують, що при такому представленні ліній шпангоутів за масштабом Бонжана, які майже прямолінійні на більшій частині довжини транспортних суден, похибка при диферентуванні невелика і достатня до практичних розрахунків.

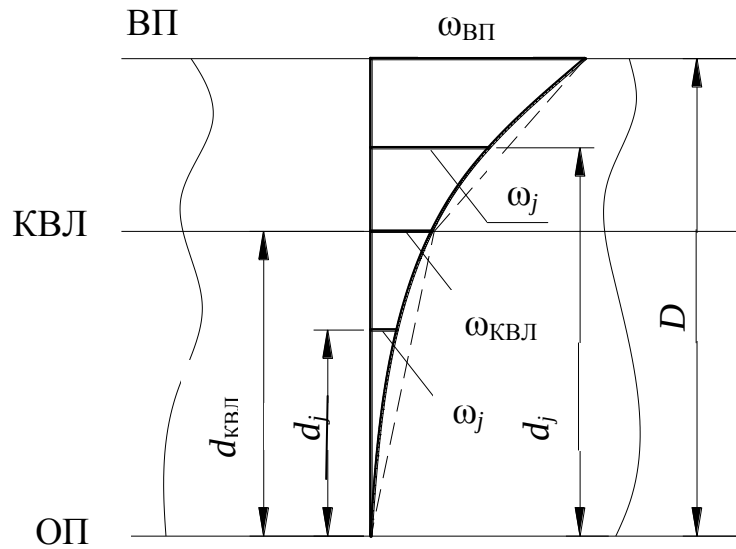


Рис. 5 – Апроксимація площ шпангоутів за масштабом Бонжана

Апроксимація дає можливість обчислення площ шпангоутів для будь-якого осідання d_j (рис. 5):

$$\text{при } d_j \geq d_{\text{квл}} \quad \omega_j = \omega_{\text{квл}} + \frac{d_j - d_{\text{квл}}}{D - d_{\text{квл}}} (\omega_{\text{вп}} - \omega_{\text{квл}});$$

$$\text{при } d_j < d_{\text{квл}} \quad \omega_j = \frac{d_j}{d_{\text{квл}}} \omega_{\text{квл}}$$

де $d_{\text{квл}}$ – осідання судна по конструктивну ватерлінію, м; D – розрахункова висота борту на міделі, м; $\omega_{\text{квл}}$ – площа зануреної частини j -го теоретичного шпангоуту на рівні конструктивної ватерлінії, м^2 ; $\omega_{\text{вп}}$ – площа j -го шпангоуту на рівні верхньої палуби, м^2 .

З урахуванням залежностей (17)-(19) диферентування судна здійснюється методом послідовних наближень таким чином. З початку

приймається, що судно не має диференту і його осідання в нульовому наближенні відповідає конструктивній ватерлінії $d_{(0)} = d_{\text{КВЛ}}$. Якщо $d_{\text{КВЛ}}$ не задана, то в якості первинної може бути прийнята ватерлінія з осіданням $d_{(0)} = 0,7D$. За формулами алгоритму (12) і (13) розраховуються об'ємна водотоннажність $\nabla_{(0)}$ та абсциса центру величини $x_{C(0)}$ з перевіркою умов плавучості (15) і (16). При порушенні цих умов у наступному наближенні обчислюється прирощення до осідання горизонтальної ватерлінії

$$\delta d_{(k)} = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} - \nabla_{(k-1)}}{L \cdot B} \quad (20)$$

та визначається її нове положення:

$$d_{(k)} = d_{(k-1)} + \delta d_{(k)}, \quad (21)$$

де k – номер наближення для коректування горизонтального положення ватерлінії; B – розрахункова ширина судна на міделі.

При новому осіданні судна уточнюється величини об'ємної водотоннажності та абсциси центру величини з перевіркою умов (15) і (16). Якщо ці умови не виконуються, то у наступному наближенні повторно обчислюються прирощене осідання і нове положення ватерлінії за формулами (20) і (21).

Коректування горизонтального положення ватерлінії здійснюється за знаком прирощення: при $\delta d_{(k)} \geq 0$ ватерлінія підіймається; при $\delta d_{(k)} < 0$ – опускається. Коректування закінчується при виконанні умови (15) із заданою точністю. Їй відповідає прийняте прирощення осідань $\delta d_{(k)} \leq 0,1$ м. Якщо при цьому порушується умова плавучості (16), то призводиться подальше уточнення знайденого положення горизонтальної ватерлінії з подальшим її поворотом відносно міделевого перерізу судна.

При цьому обчислення прирощень осідань судна носом і кормою здійснюється за залежностями

$$\delta d_{H(s)} = \frac{x_g - x_{C(s-1)}}{2}; \quad \delta d_{K(s)} = -\delta d_{K(s)} \quad (22)$$

та визначається нове положення похилої ватерлінії:

$$\delta d_{H(s)} = d_{H(s-1)} + \delta d_{H(s)}; \delta d_{K(s)} = d_{K(s-1)} + \delta d_{K(s)}, \quad (23)$$

де (s) – номер наближення для коректування повороту ватерлінії відносно міделя.

Після розрахунку об'ємної водотоннажності та абсциси центра величини за формулами (12) та (13) перевіряють умови (15) і (16). При їх порушенні знову коректують положення похилої ватерлінії на основі залежностей (22) і (23): збільшують осідання судна при $\delta d_{H(s)} \geq 0$ або зменшують осідання при $\delta d_{H(s)} < 0$.

Диферентування судна полагають завершеним при одночасному виконанні умов плавучості (15) і (16). Для визначеного положення рівновісної ватерлінії остаточно визначають величини ∇ та x_C , які відповідають визначеним в розрахунку удиферентування силам підтримки з боку води.

В процесі диферентування може статися, що осідання судна носом і кормою більше висоти борту, тобто судно опиняється під водою. Це означає або наявність помилок у вихідних даних, або помилок при обчисленнях. При розрахунках на ПК можуть мати місце тільки помилки у вихідних даних. Тут також можливі декілька причин. Перша і основна причина полягає у помилковому заданні даних за судном (більш за все, це помилки у розмірності величин). Друга причина може мати місце у курсовому проєктуванні, де вихідні дані складаються масштабуванням за будь-якому проєкту судна. При цьому може статися невідповідність розподілення вагового навантаження прийнятих вихідних даних за судном силам підтримки («судно під водою» – коментар ПК). У цьому випадку передбачається коректування навантаження за шпаціями при тим же ваговим навантаженням на судно. Перерозподіл навантаження за шпаціями здійснюється пропорційно статичному моменту різності сил навантаження з координатами центру ваги x_g і величини x_C відносно міделевого перерізу судна. Тоді нові навантаження за шпаціями будуть обчислені за формулою

$$P_{j\text{нов}} = P_j + P'_j, \quad (24)$$

де P'_j – приращення навантаження за j -ю шпацією

$$P'_j = \frac{S_1}{(n-1)x_j}. \quad (25)$$

Тут позначено: S_1 – статичний момент різності сил тяжіння:

$$S_1 = (x_c - x_g) \sum_{j=1}^{n-1} P_j; \quad (26)$$

x_j – координати центру ваги навантаження на шпацію, що розраховуються за формулою (11).

Після визначення допоміжних величин у даному параграфі обчислюється за програмою LS-17 зрізуючі сили $N(x)$ та згинальні моменти $M(x)$ корпусу судна на тихій воді у перерізах за теоретичними шпангоутами (x – координата від міделя за довжиною судна).

Згин судна на тихій воді здійснюється від інтенсивності результативного навантаження у перерізах корпусу за формулою:

$$q(x) = p(x) - \gamma \omega(x), \quad (27)$$

де $q(x)$ – інтенсивність сил ваги, обумовлена східчатою кривою навантаження; $\gamma \omega(x)$ – інтенсивність сил підтримки з боку води для удиферентованого положення судна; $\omega(x)$ – занурена площа шпангоуту, що обирається за масштабом Бонжана для рівнозваженої ватерлінії у розглядаємому стані вагового навантаження; γ – питома вага забортної води.

Зрізуючі сили $N(x)$ та згинальні моменти $M(x)$ корпусу судна при відрахуванні координати x за довжиною судна L від міделєвого перерізу визначаються шляхом інтегрування з корми судна погонного навантаження $q(x)$. Зрізуючі сили розраховуються за формулою:

$$N(x) = N_p(x) - N_\omega(x), \quad (28)$$

де $N_p(x)$ – частина зрізуючої сили від вагового навантаження, яка розраховується за правилом прямокутників наближеного метода чисельного інтегрування:

$$N_p(x) = \int_{-0,5L}^x p(x)dx = \sum_{j=1}^m P_j; \quad (29)$$

$N_\omega(x)$ – друга частина зрізуючої сили від сил підтримки з боку води, яка розраховується за правилом трапецій:

$$N_\omega(x) = \gamma \int_{-0,5L}^x \omega(x)dx = l_j \left(\sum_{j=2}^{n-1} \omega_j + \frac{\omega_1 + \omega_n}{2} \right); \quad (30)$$

де $(n - 1)$ – кількість теоретичних шпаций за довжиною судна (n – число теоретичних шпангоутів).

Згинаючі моменти в перерізах j -го теоретичного шпангоуту обчислюються за правилом трапецій:

$$M(x) = \int_{-0,5L}^x N(x)dx = l \left(\sum_{j=2}^{n-1} N_j + \frac{N_1 + N_n}{2} \right). \quad (31)$$

Підготовка бланка вихідних даних для розрахунку зрізаючих сил та згинальних моментів корпусу судна на тихій воді за програмою для ПК LS-17 та результати прикладу розрахунків надані у Додатку В.

Інтеграли алгоритму розрахунку зі змінною верхньою межею у формулах (29)-(31) обчислюються за наближеними правилами чисельного інтегрування. Зрізуюча сила та згинальний момент у крайньому носовому перерізі повинні дорівнювати нулю: $N(0,5L) = 0$; $M(0,5L) = 0$. Однак, при використанні наближених методів інтегрування накопичуються деякі похибки, тому ці умови в точності не виконуються.

Прийнято, що при дотриманні наближених умов

$$\frac{N_{sw}(0,5L)}{N_{sw}^{\max}} \leq 0,05; \frac{M_{sw}}{M_{sw}^{\max}} \leq 0,05 \quad (32)$$

ординати зрізаючих сил та згинальних моментів потрібно відраховувати від нахилених прямих, що з'єднують нульові ординати $N_{sw}(-0,5L) = 0$ і $M_{sw}(-0,5L) = 0$ на крайньому кормовому шпангоуті з відмінними від нуля ординатами $N_{sw}(0,5L)$ і $M_{sw}(0,5L)$ на крайньому носовому шпангоуті.

Обчислення за формулою (28)-(31) виконуються для всіх розрахункових випадків вагового навантаження. Правило знаків для $N_{sw}(x)$ та $M_{sw}(x)$ у

перетинах корпусу судна відп а) зрізуюча сила N ятому в будівельній механіці корабля [5] (рис. 6):

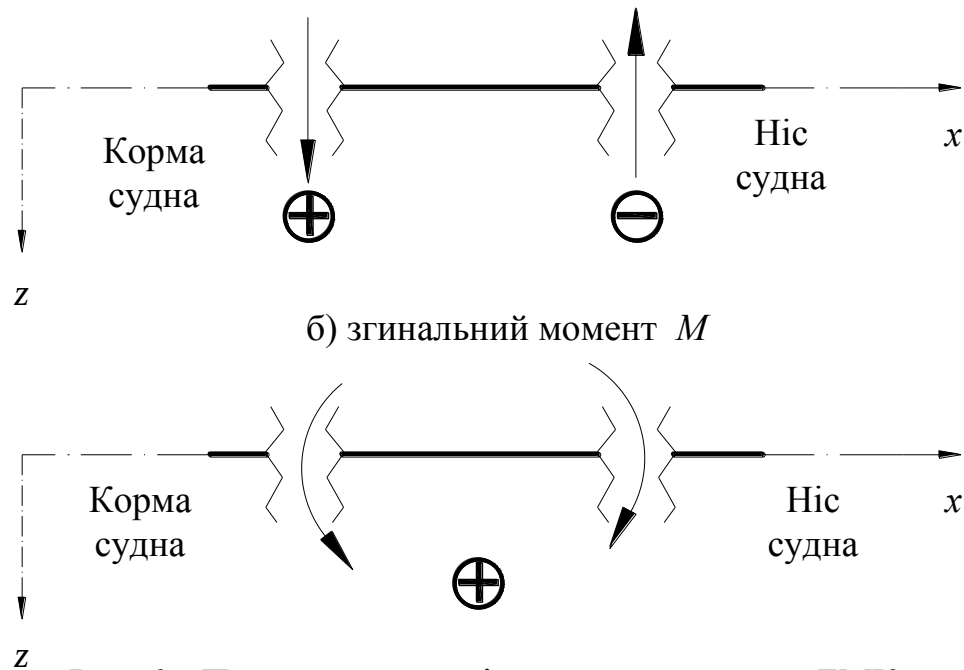


Рис. 6 – Правило для знаків N і M , прийняте в БМК

За результатами розрахунків зрізуючих сил $N_{SW}(x)$ і загальних моментів $M_{SW}(x)$ на тихій воді будуються епюри розподілення цих силових факторів за станами навантаження за довжиною судна (наприклад, за рис. 7) з визначенням:

- найбільшого за абсолютною величиною згинального моменту $M_{SW}^{\max}$ і встановлення значення x в районі відносно міделя, де виникає цей момент при прогині або перегині корпусу судна;

- найбільшого абсолютного значення зрізуючої сили $N_{SW}^{\max}$ і встановлення значення x , де виникає цей внутрішній фактор.

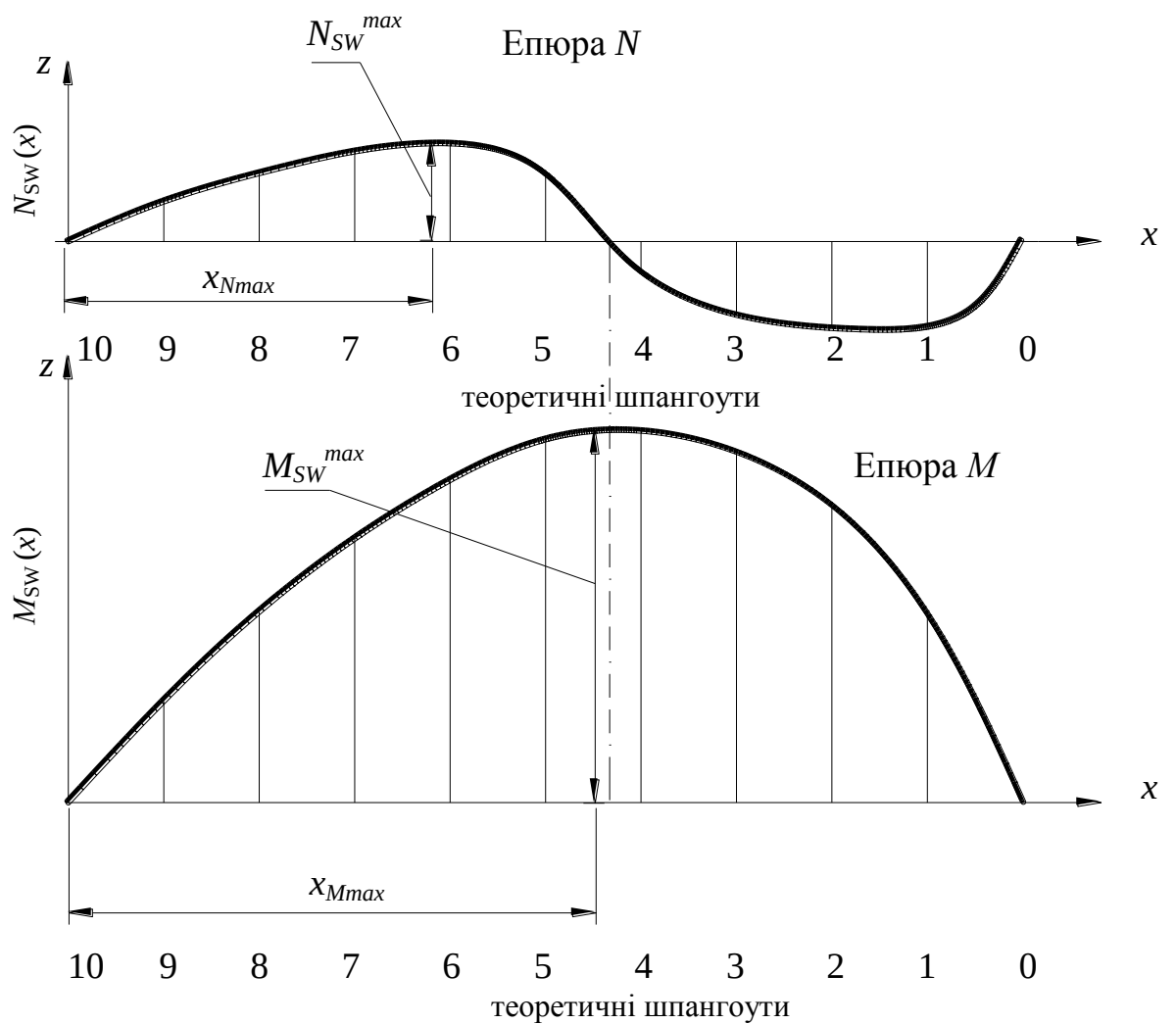


Рис. 7 – Епюри N_{SW} і M_{SW} для судна на тихій воді (позначення N_{SW} і M_{SW} відповідають Регістру судноплавства України)

Величини $N_{SW}^{max}(x)$ та $M_{SW}^{max}(x)$ використовуються в подальшому при нормуванні міцності судна.

При наближеній оцінці згинальних моментів корпусу судна у міделевому перерізі може бути використана спрощена схема розрахунку M_{SW}^{max} на тихій воді [5]:

$$M_{SW}^{max} = \pm \frac{\Delta \cdot L}{m_{SW}}, \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (33)$$

де Δ - вагова водотоннажність, при якій ймовірне виникнення максимального згинаючого моменту на міделі, кН; L - довжина судна між

перпендикулярами, м; m_{sw} – безрозмірний коефіцієнт згинального моменту; знак "+" відповідає перегину корпусу судна, знак "-" прогину корпусу.

Числове значення коефіцієнту m_{sw} залежить від типу судна, його довжини L , коефіцієнта загальної повноти C_B .

За статистичними даними [5] для суден довжиною L від 100 до 250 м при відносній осадці $\frac{d}{L}$ у межах 0,045...0,070 та при значеннях коефіцієнтів повноти $C_B = 0,70...0,83$ коефіцієнт m_{sw} змінюється у межах 65...94.

Для суховантажних суден при $C_B = 0,60...0,80$ значення m_{sw} знаходиться у межах 55...110.

Для танкерів значення m_{sw} за статистичними даними [1, 3] наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Залежність безрозмірного коефіцієнту згинального моменту m_{sw} від довжини судна L та коефіцієнту загальної повноти C_B

C_B	L , м					
	100	140	180	200	250	300
0,75	105	120	140	160	180	200
0,80	75	90	100	110	120	130

Для сучасних крупнотонажних танкерів значення m_{sw} підвищується до 300...350.

2.1.2.3 Розрахунок хвильових та ударних згинальних моментів і зрізуючих сил корпусу судна за Правилами Регістра судноплавства України

На сучасному етапі узагальнення досвіду експлуатації суден та нормуванні їх міцності *хвильовий згинальний момент*, який діє у вертикальній площині в районі міделя розрахункового поперечного перетину корпусу, визначається за формулами [6, 7, 8]:

а) при перегині судна

$$M_w = 190c_w B L^2 C_B \alpha \cdot 10^{-3}, \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad (34)$$

б) при прогині судна

$$M_w = -110c_w B L^2 (C_B + 0,7) \alpha \cdot 10^{-3}, \text{ кН} \cdot \text{м}, \quad (35)$$

де B, L – відповідно ширина та довжина судна, м; c_w – хвильовий коефіцієнт, який визначається в залежності від довжини судна:

$$\left. \begin{aligned} c_w &= 0,0856L && \text{при } L \leq 90 \text{ м;} \\ c_w &= 10,75 - \frac{(300 - L)^{\frac{3}{2}}}{100} && \text{при } 90 \text{ м} < L < 300 \text{ м;} \\ c_w &= 10,75 && \text{при } 300 \text{ м} \leq L < 350 \text{ м;} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

де C_B – коефіцієнт загальної повноти судна, визначений для кожного стану навантаження за формулою $C_B = \frac{\nabla}{LBd}$, але не менше 0,6; B, d – відповідно ширина та осідання судна у міделевому перерізі, м; α – коефіцієнт, який визначається за табл. 3

Таблиця 3 – Значення коефіцієнту α в розрахунках хвильових моментів

Положення перерізу за довжиною судна	α
$x/L < 0,40$	$2,5x/L$
$0,40 \leq x/L \leq 0,65$	1,0
$x/L > 0,65$	$(1 - x/L)0,35$

Для перерізу корпусу судна в районі міделя при $0,40 \leq x/L \leq 0,65$, де діє максимальний згинальний момент на тихій воді $M_{sw}^{\max}(x)$ (величина x для якого вже визначена), значення коефіцієнта α в розрахунку хвильового моменту приймається $\alpha = 1,0$.

Остаточні за формулами (34) і (35) розраховуються хвильові згинальні моменти за станами навантаження судна і в якості максимального розрахункового значення приймається той $M_w^{\max}(x)$, що забезпечує

найбільшу абсолютну величину моменту. В подальших розрахунках з нормування повздовжньої міцності судна це значення максимального хвильового моменту приймається зі своїм знаком.

Хвильова зрізуюча сила $N_w(x)$ в розглядаємому поперечному перерізі визначається за формулами:

- додатна

$$N_w = 30c_w BL(C_B + 0,7)f_1 \cdot 10^{-2}, \text{ кН}, \quad (37)$$

- від'ємна

$$N_w = -30c_w BL(C_B + 0,7)f_2 \cdot 10^{-2}, \text{ кН}, \quad (38)$$

де f_1 та f_2 – коефіцієнти, які визначаються за табл. 4.

Значення координати x для хвильової зрізуючої сили $N_w(x)$ відповідає положенню перерізу при дії максимальної зрізуючої сили на тихій воді $N_{sw}^{\max}(x)$ (див. рис. 7).

Остаточно визначається максимальне значення за абсолютною величиною зрізуючої сили $N_w^{\max}(x)$ для станів навантаження судна, яке в нормуванні поздовжньої міцності суден враховується зі своїм знаком.

Таблиця 4 – До розрахунку коефіцієнтів f_1 і f_2 при визначенні хвильових зрізаючих сил

Розташування перерізу за довжиною судна	f_1	f_2
1	2	3
$0 \leq x/L < 0,2$	$4,6 f_o x/L$	$4,6 x/L$
$0,2 \leq x/L \leq 0,3$	$0,92 f_o$	$0,92$
$0,3 < x/L < 0,4$	$0,7 + (9,2 f_o - 7) (0,4 - x/L)$	$1,58 - 2,2x/L$
$0,4 \leq x/L \leq 0,6$	$0,7$	$0,7$
$0,6 < x/L < 0,7$	$0,7 + 3(x/L - 0,6)$	$0,7 + (10f_o - 7) (x/L - 0,6)$
$0,7 \leq x/L \leq 0,85$	$1,0$	f_o
$0,85 < x/L \leq 1,0$	$6,67(1 - x/L)$	$6,67(1 - x/L) f_o$
$f_o = 190C_b / 110(C_b + 0,7)$		

В курсовій роботі ударна (динамічна) складова згинального моменту при слемінгу на вершині та подошві хвилі може бути визначена за даними [4]:

$$M_F = 0,1 \cdot M_w^{\max}, \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (39)$$

Остаточно складаються таблиці максимальних значень згинальних моментів і зрізуючих сил за прийнятими станами навантаження на тихій воді, хвилеутворенні та від слемінгу.

2.1.3 Розрахунок еквівалентного бруса

2.1.3.1 Складання геометричного перерізу корпусу судна. Обчислення геометричних характеристик еквівалентного бруса в першому наближенні

Розрахунок еквівалентного бруса має за мету: визначення напруженості складових елементів корпусу та судна в цілому; перевірку стійкості ребер жорсткості та пластин, найбільш віддалених від нейтральної вісі міделевого перерізу; перевірку загальної міцності судна при його проектуванні.

Загальний згин корпусів суден у вертикальній площині моделюється із застосуванням схеми еквівалентного бруса (рис. 8,б), тобто для безопорної непризматичної багатопояскової балкою.

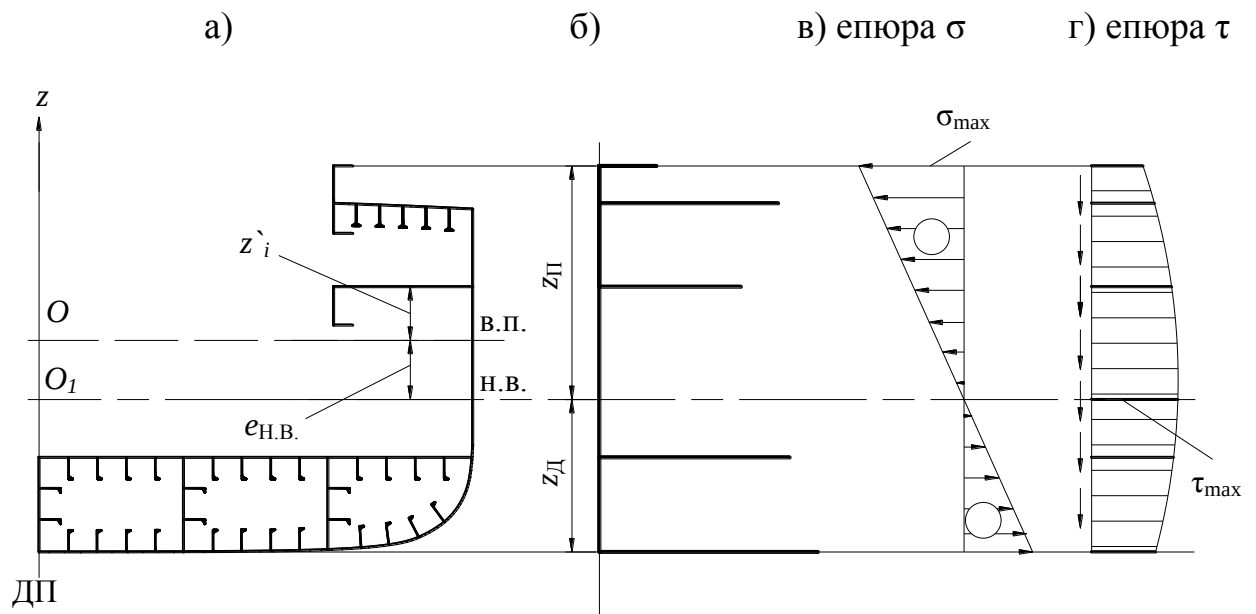


Рис. 8 – Поперечний переріз судна (а), схема еквівалентного бруса (б), епюра нормальних(в) та дотичних (г) напружень загального згину судна-балки (в.п. – вісь порівняння; н.в. – нейтральна вісь).

До складу еквівалентного бруса включають тільки поздовжні в'язі (елементи) суднового корпусу, які задовольняють наступним умовам:

а) в'язі повинні бути неперервними майже для усієї довжини судна та жорстко приєднаними до інших міцних елементів корпусу; це зовнішня обшивка корпусу, настили палуб та другого дна, неперервні міцні поздовжні балки та ребра жорсткості;

б) перервні в'язі можуть зараховуватися до складу еквівалентного бруса тільки при виконанні певних умов [4, 5]. Наприклад, надбудови повинні спиратися не менш ніж на три поперечні переділки, бути приєднаними до бортів чи поздовжніх переділок корпусу з урахуванням включення матеріалу надбудов у загальний згин судна. Перервні ребра жорсткості (як і інші перервні в'язі) зараховуються при умові $l_{p.ж.} \geq 3h_{p.ж.}$ ($l_{p.ж.}$, $h_{p.ж.}$ – довжина та висота в'язів) у перерізі, а достатньо широкі вирізи у палубах більш як $0,18B$ (B – ширина судна) впливають на зарахування матеріалу настилу палуби частково [4, 5].

В масштабі 1:100 або 1:50 складається розрахунковий переріз корпусу судна (рис. 8, а). З урахуванням симетрії перерізу корпусу судна відносно ДП розрахунок здійснюється для половини розрахункового перерізу, тобто перерізу еквівалентного бруса.

В'язі при необхідності об'єднуються в групи і нумеруються, починаючи з елементів ВП і закінчуючи елементами зовнішньої обшивки днища. Вісь порівняння (в.п.), від якої відраховуються ординати в'язей, рекомендується приймати посередині висоти борту; вертикальна вісь z направлена вгору.

Складається таблиця розрахунку геометричних характеристик еквівалентного бруса (табл. 5). При обчисленні власних моментів інерції $i_{вл}$ (стовпець 8 таблиці 5) розглядаються лише моменти інерції вертикальних в'язей відносно їх власних горизонтальних осей (листів борта, поздовжніх переділок, вертикального кіля, днищових стрингерів, стінок комінгсів тощо)

$i_{\text{вл}} = \frac{t \cdot h^3}{12}$, а поздовжні ребра жорсткості горизонтальної вісі, яка проходить через центр ваги перерізу елемента.

Таблиця 5 – Розрахунок геометричних характеристик еквівалентного бруса

№ з/п	Найменування елемента бруса	Розміри елемента, мм	Площа перетину елемента, $F_i, \text{см}^2$	Відстань від о.п., $z_i, \text{м}$	Статичний момент площі, $F_i \cdot z_i, \text{см}^2 \cdot \text{м}$	Момент інерції площі		Відстань від н.в., $z_i = z_i' - e_{\text{н.в.}}$
						Переносний $F_i \cdot (z_i')^2, \text{см}^2 \cdot \text{м}$	Власний $i_{\text{вл}}, \text{см}^2 \cdot \text{м}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
...								
n								
Σ	-	-	Σ_1	-	Σ_2	Σ_3		-

Після заповнення таблиці і розрахунку зазначених у таблиці сум визначаються геометричні характеристики площі поперечного перерізу еквівалентного бруса за наступними формулами:

- положення нейтральної вісі:

$$e_{\text{н.в.}} = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1}, \text{ м}; \quad (40)$$

якщо $e_{\text{н.в.}} < 0$, то нейтральна вісь пересувається вниз від вісі порівняння;

- момент інерції площі перерізу відносно нейтральної вісі:

$$I_{\text{н.в.}} = 2(\Sigma_3 - e_{\text{н.в.}}^2 \cdot \Sigma_1), \text{ см}^2 \cdot \text{м}^2; \quad (41)$$

- момент опору площі перерізу відносно днища:

$$W_D = \frac{I_{H.B.}}{|z_D|}, \text{ см}^2 \cdot \text{м}; \quad (42)$$

- момент опору площі перерізу відносно верхньої палуби:

$$W_{\Pi} = \frac{I_{H.B.}}{|z_{\Pi}|}, \text{ см}^2 \cdot \text{м}; \quad (43)$$

де z_D і z_{Π} показано на рис. 8, а.

Табл. 5 розрахунку еквівалентного бруса може бути доповнена в останньому стовпці визначенням ейлеревих (критичних) напружень для поздовжніх ребер жорсткості та пластин корпусу судна за формулами (43)-(46).

Виконаний таким чином розрахунок еквівалентного бруса має назву “розрахунок у першому наближенні”, оскільки він не враховує можливість втрати стійкості окремих поздовжніх в’язей корпусу судна при загальному згині судна. Але втрата їх стійкості для традиційних типів суден від дії M_{SW} зазвичай практично відсутня [5]. Щодо перевірки стійкості пластин палуби та днища судна, то вона має сенс від дії найбільшого (граничного) згинального моменту корпусу ($M_{ГР}$), який визиває появу у найбільш віддалених в’язях міделевого перерізу напружень, рівних границі плинності σ_s . Для врахування втрачених при цьому стійкості цих гнучких елементів корпусу судна використовується процедура редуціювання пластин [4, 5] (див. п.2.1.4 та рис. 12).

2.1.3.2 Розрахунок стійкості перекриття верхньої палуби

Верхні палуби морських транспортних суден складаються з неперервних поздовжніх ребер жорсткості та поперечних рамних бімсів, які їх підтримують. Стискаючі напруження при згині судна на тихій воді і при положенні судна на подошві хвилі сприймають ребра жорсткості, тому вони й можуть втратити стійкість, чого допустити не можна при загрозі можливої руйнації конструкції чи всього корпусу. Тому в комплексі міцностних розрахунків при їх проектуванні здійснюють перевірку палубних перекриттів на стійкість від дії стискаючих зусиль T .

Для традиційних типів суден, які розглядаються в курсовій роботі (суховантажні судна і танкери), розрахункова схема перекриттів ВП залежить від типу судна і складається з однакових рівновіддалених ребер жорсткості і рамних бімсів.

Наприклад, схема перекриття ВП суховантажних суден формується найчастіше в районі люкового вирізу. Перекриття розглядається між поперечними переділками з одного боку, бортом і карлінгсом-комінгсом з другого боку (рис. 9). Приймається, що на поперечних переділках повздовжні ребра жорсткості розглядаються шарнірно закріпленими, так як переділки практично не деформуються у своїй площині і створюють для ребер жорсткості опори. На борту і на комінгс-карлінгсі бімси розглядаються як пружно затиснені з коефіцієнтами опорної пари α_i (див. рис. 9).

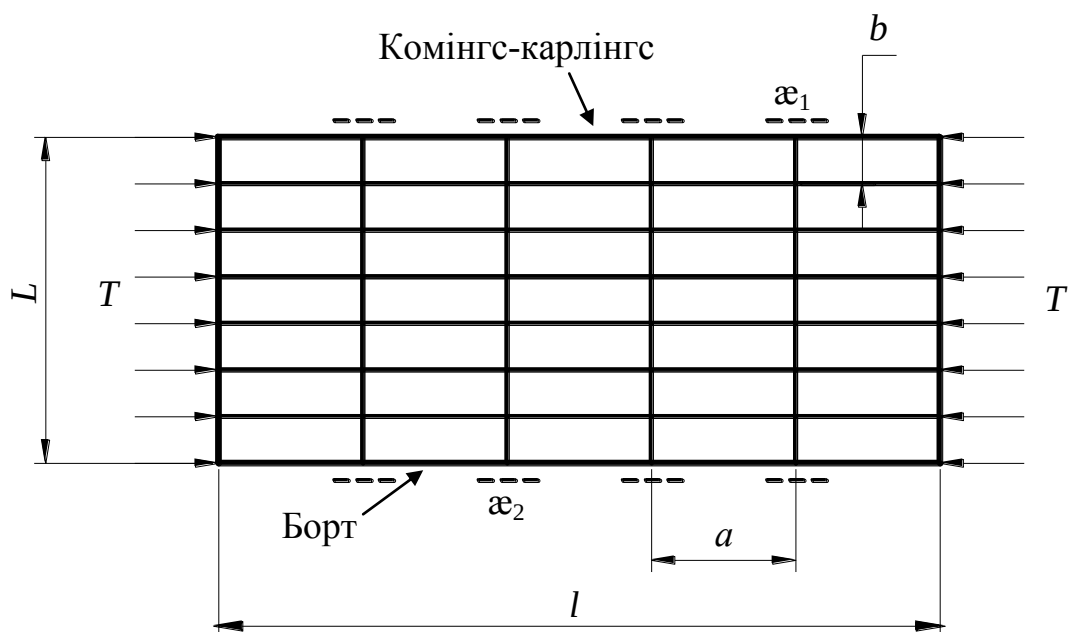


Рис. 9 – Схема перевірки стійкості палубного перекриття суховантажного корпусу судна

З помилкою у безпечний бік можна наближено вважати, що рамні бімси вільно оперті на комінгс-карлінгс при порівняльній жорсткості бімса і карлінгс-комінгса ($EI_B \cong EI_K$) і тому $\alpha_i = 0$. Іншим кінцем бімси пружно

закріплені на борту і коефіцієнт опорної пари α_2 можна розрахувати за формулою [4]:

$$\alpha_2 = \frac{l}{1 + 0,575 \frac{l_{\text{шп}}}{L}}, \quad (44)$$

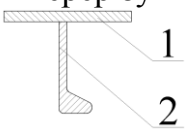
де $l_{\text{шп}}$ – довжина прогону шпангоуту, який приєднується до бімса; L – ширина перекриття (рис. 9).

Для танкерів схема палубного перекриття при розрахунках на стійкість може розглядатися між повздовжніми і поперечними переділками (рис. 9). Умови закріплення повздовжніх ребер жорсткості такі ж, як і для суховантажних суден. Рамні бімси розглядаються, як пружно закріплені з коефіцієнтом опорної пари α , або, у крайньому випадку, жорстко закріплені при $\alpha \cong 1$ (бімси практично не мають кутів повороту на опорах).

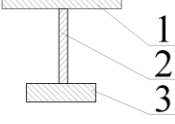
Для розрахунку стійкості перекриття необхідно визначити значення моментів інерції ребер жорсткості i та рамних бімсів I , як балок з приєднаними поясками настилу палуби.

Розрахунок зазначених моментів інерції балок проводиться у табличній формі (табл. 6, 7). Вісь порівняння слід прийняти на рівні центру ваги приєданого пояска настилу палуби. Ширина приєданого пояска приймається меншою із значень: $\frac{1}{6}$ довжини балки, або відстань між однотипними балками.

Таблиця 6 – Розрахунок геометричних характеристик ребра жорсткості з приєднаним пояском

Ескіз перерізу 	Елементи перерізу	Розміри перерізу, мм	$F_i, \text{см}^2$	$z, \text{см}$	$F_i \cdot z_i, \text{см}$	$F_i \cdot z_i^2$	i_B
						см^4	
			Σ_1	-	Σ_2	Σ_3	

Таблиця 7 – Розрахунок геометричних характеристик рамного бімса з приєднаним пояском

Ескіз перерізу	Елементи перерізу	Розміри перерізу, мм	$F_i, \text{см}^2$	$z, \text{см}$	$F_i \cdot z_i, \text{см}$	$F_i \cdot z_i^2$	i_B
						см^4	
							
			Σ_1	-	Σ_2	Σ_3	

Розрахункові геометричні характеристики перерізів зазначених балок:

- *положення нейтральної вісі*

$$e = \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1}, \text{см}; \quad (39)$$

- *момент інерції площі поперечного перерізу відносно нейтральної вісі*

$$I \text{ або } i = \Sigma_3 - e^2 \cdot \Sigma_1, \text{см}^4. \quad (40)$$

Перевірка стійкості палубного перекриття з поздовжньою системою набору (див. рис. 9) здійснюється за формулою професора П.Ф. Папковича [4, 5]:

$$I = \left(\frac{\pi}{\mu}\right)^4 \cdot \left(\frac{L}{a}\right)^3 \cdot \left(\frac{L}{e}\right) \varphi \cdot i \cdot \chi_j(\lambda), \text{см}^4, \quad (41)$$

де I, i – моменти інерції площі поперечного перерізу відповідно рамних бімсів та поздовжніх ребер жорсткості, см^4 ; $\left(\frac{\pi}{\mu}\right)^4$ – параметр, який залежить від коефіцієнтів опорної пари α_1 і α_2 рамних бімсів і визначається за довідковими таблицями [6, 8]; $\varphi = \frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_e}$ – коефіцієнт, який враховує відхилення від закону Гука і визначається довідковими таблицями [6, 8]: $\sigma_{\text{кр}}$ і σ_e – відповідно критичні та ейлерові напруження в балках; $\sigma_{\text{кр}}$ в курсовій роботі можна прийняти $\sigma_{\text{кр}} = 0,8 \sigma_s$, а σ_e – визначається за графіками [8]; $\chi_j(\lambda)$ – функція, яка залежить від числа півхвиль втрати стійкості j , числа прогонів поздовжніх ребер жорсткості у складі перекриття і параметра

$\lambda = \frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_{\text{кр}}^0}$, $\sigma_{\text{кр}}^0$ – критичні напруження для ребра жорсткості, якщо бiмси для них відіграють роль жорстких опор.

Згинальна жорсткість бiмсів з $\sigma_{\text{кр}}^0$ отримала назву *критичної жорсткості* $EI_{\text{кр}}$ і це означає, що при необхідності за рахунок збільшення жорсткості бiмсів вже не можна далі підвищувати рівень стійкості перекриття в цілому.

За формулою (41) визначається *необхідний момент інерції бiмса* $I_{\text{н}}$ і йому відповідає *необхідна жорсткість бiмса* $EI_{\text{н}}$, коли поздовжні ребра жорсткості втрачають стійкість за визначеним числом півхвиль j . Цю необхідну жорсткість бiмсів $EI_{\text{н}}$ порівнюють з фактичною жорсткістю $EI_{\text{ф}}$ (значення $I_{\text{ф}}$ розраховується в табл. 7). Якщо $EI_{\text{ф}} > EI_{\text{н}}$, то це означає, що перекриттю ВП *забезпечена стійкість* при зусиллях стискання. У разі $EI_{\text{ф}} \leq EI_{\text{н}}$ необхідно проаналізувати можливі шляхи зниження маси перекриття. В іншому разі при $EI_{\text{ф}} > EI_{\text{н}}$ слід подати пропозиції щодо збільшення стійкості перекриття.

2.1.3.3 Розрахунок стійкості поздовжнього набору та пластин, що входять до еквівалентного бруса

Стійкість поздовжніх елементів конструкцій корпусу від дії стискаючих навантажень при загальному згині судна перевіряється шляхом порівняння ейлеревих $\sigma_{\text{е}}$ (критичних напружень $\sigma_{\text{кр}}$) з розрахунковим напруженням стискання $\sigma_{\text{ст}}$.

Розрахунок стійкості поздовжніх ребер жорсткості ВП здійснюється як найбільш віддалених від нейтральної вісі міделевого перерізу корпусу судна і завантажених максимальними стискаючими зусиллями. Якщо жорсткість поперечних в'язів (бiмсів) достатньо велика, то їх можна розглядати жорсткими опорами для поздовжніх ребер жорсткості. А останні можна рахувати як багатопрогонові шарнірно оперті балки. Відомо, що стійкість такої нерозрізної балки визначається стійкістю одного прогона a (рис. 10).

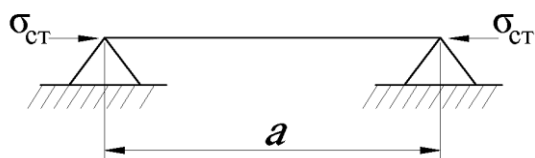


Рис. 10 – Розрахункова схема ребра жорсткості при стисканні

Напруження стискання $\sigma_{\text{ст}} = \sigma_i$ для ребер жорсткості ВП, як найбільш віддалених від нейтральної вісі перерізу при загальному згині корпусу судна на подошві хвилі у разі виникнення у крайніх точках перерізу ВП напружень плинності σ_s (див. рис. 10), розраховуються за формулою

$$\sigma_i = -\sigma_s \cdot \frac{Z_i}{Z'_{\text{max}} - e_{\text{н.о.}}}, \text{ МПа.} \quad (42)$$

Ейлерові напруження ребра жорсткості визначаються залежністю

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot i_{\text{рж}}}{f_{\text{рж}} \cdot a^2}, \text{ МПа,} \quad (43)$$

де $i_{\text{рж}}$, $f_{\text{рж}}$ – відповідно момент інерції і площа поперечного перетину ребра жорсткості з приєднаним пояском (див. табл. 5).

Критичні напруження $\sigma_{\text{кр}}$, які враховують відступ від закону Гука, визначаються за довідковими графіками одного з джерел [5, 6, 8] за схемою

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_s} \rightarrow \frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_s} \rightarrow \sigma_{\text{кр}}, \text{ де } \sigma_s - \text{ границя плинності матеріалу, МПа.}$$

Ребра жорсткості не втрачають стійкості при умові $\sigma_{\text{ст}} < \sigma_e$.

При розрахунках стійкості пластин із табл. 5 для геометричних характеристик еквівалентного бруса відокремлюються дві розрахункові схеми пластин в оцінці їх стійкості від напружень стискання $\sigma_{\text{ст}}$ (рис. 11 а, б).

Граничні умови пластин за контуром відповідають шарнірному опираю, що обґрунтовується таким чином. Набір, який оточує пластину, при втраті нею стійкості зазнає деформацію кручення і протидіє вільному повороту опорного перерізу пластини у зрівнянні з вільно опертою, що підвищує σ_e на 10-15%; з другого боку, врахування відступу від закону Гука

наближено на стільки ж відсотків знижує величину σ_e . Тому в розрахунковій практиці не враховують деформацію кручення ребер набору та відступ від закону Гука і розглядають пластину вільно опертую за контуром з розрахунком для неї *ейлеревих напружень* σ_e :

- за поздовжньою системою набору (рис. 11 а):

$$\sigma_e = 80 \left(\frac{100t}{a} \right)^2, \text{ МПа}, \quad (*)$$

де a – довжина короткої сторони пластини, см; t – товщина пластини, см;

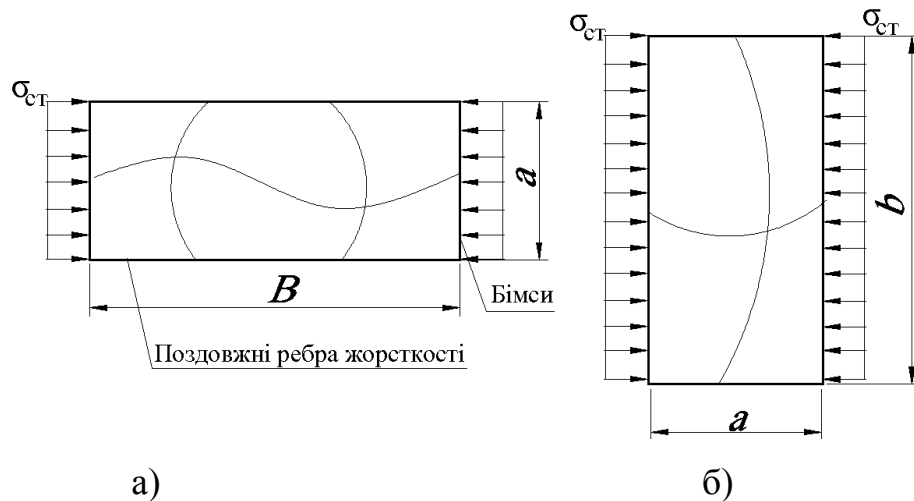


Рис. 11 – Розрахункові схеми стискання пластин

- за поперечною системою набору (рис. 11, б):

$$\sigma_e = 20 \left(\frac{100t}{a} \right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^2, \text{ МПа}, \quad (45)$$

де b – довжина більшої сторони пластини, см;

- для листів обшивки скули

$$\sigma_e = 1270 \left(\frac{100t}{r} \right)^2, \text{ МПа}, \quad (46)$$

де r – радіус закруглення скули, см.

В розрахунках за усіма наведеними формулами слід враховувати, що величина σ_e не може бути більше границі плинності σ_s . Тому при $\sigma_e > \sigma_s$ слід приймати $\sigma_e = \sigma_s$. Результати розрахунку ейлеревих напружень пластин зводяться у табл. 8.

Таблиця 8 – Ейлерові напруження пластин

№ пластини	Найменування пластини	a , см	b , см	t , см	σ_e , МПа
1	2	3	4	5	6

Стовпці 1 та 2 заповнюються на основі розрахунку геометричних характеристик еквівалентного бруса (див. табл. 5).

Умова забезпечення стійкості пластин $\sigma_{ст} < \sigma_e$.

2.1.4 Перевірка загальної міцності корпусу судна за Правилами Регістра судноплавства України

2.1.4.1 Розрахунок мінімальних значень моменту опору та моменту інерції міделевого перерізу корпусу судна

Наступні вимоги регламентують мінімальні значення моментів опору та інерції міделевого перерізу корпусу судна відносно нейтральної вісі на підставі Правил Регістру судноплавства України [1], які можуть розглядатися в якості наближеного підходу для оцінки загальної міцності суден.

У всіх випадках експлуатації суден як на тихій воді, так і на хвилюванні *мінімальний момент опору* поперечного перетину корпусу повинен бути не менше, ніж визначений за формулою

$$W_{\min} = C_w B L^2 (C_B + 0,7) \eta, \text{ см}^3, \quad (47)$$

де C_w – хвильовий коефіцієнт (див. формули (36)); B та L – головні розмірення судна (відповідно ширина та довжина), м; C_B – коефіцієнт загальної повноти судна; η – коефіцієнт використання механічних властивостей матеріалу, який для сталі підвищеної якості з $\sigma_s \geq 300$ МПа дорівнює $\eta = 0,78$ [1].

Мінімальний момент інерції поперечного перетину корпусу в середній частині корпусу судна повинен бути не менше, чим визначений за формулою [1]:

$$I_{\min} = 3C_w BL^3 (C_B + 0,7), \text{ см}^4. \quad (48)$$

2.1.4.2 Перевірка загальної міцності корпусу традиційних типів суден

Розрахунковий момент опору поперечного перерізу корпусу в середній частині судна (для палуби і днища окремо) визначається за формулою [1]:

$$W^{\text{розн}} = \frac{M_T}{\sigma} \cdot 10^3, \text{ см}^3; \quad (49)$$

де M_T – розрахунковий згинальний момент в поперечному перерізі, який дорівнює максимуму абсолютної величини алгебраїчної суми складових моментів на тихій воді M_{SW} (див. п. 2.1.2.3), хвилеутворенні M_W і ударних моментів M_F (див. п.2.1.2.3) в розглядаємому перерізі:

$$M_T = |M_{SW} + M_W + M_F|, \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad (50)$$

$$\sigma = \frac{175}{\eta}, \text{ МПа}. \quad (51)$$

Перевірка загальної міцності корпусу судна в поперечному перерізі середньої частини судна постає у зіставленні мінімальних величин моментів опору (47) і моментів інерції (48) з розрахунковими значеннями моменту опору (49) для палуби (п) і днища (д) і фактичними значеннями моменту інерції перерізу $I^{\text{факт}}$ в розрахунку еквівалентного бруса:

$$\begin{aligned} W_{\text{п}}^{\text{розн}} &\geq W_{\min}; W_{\text{д}}^{\text{розн}} \geq W_{\min}; \\ I^{\text{факт}} &\geq I_{\min}. \end{aligned} \quad (52)$$

2.2 Загальна характеристика обґрунтування загальної міцності корпусів суден нових типів за Нормами міцності

Для нових конструктивних типів суден (у тому числі удосконалених існуючих типів) можуть бути використані перевірки загальної поздовжньої міцності за Нормами міцності [2, 5, 6]. Ці перевірки засновані на

використанні встановлених критеріїв міцності (див. п. 1.3) і складаються з наступних:

- 1) перевірка за критерієм експлуатаційної (втомної) міцності;
- 2) перевірка за граничними станами на згин;
- 3) перевірка за граничними умовами на зсув.

Перевірка загальної міцності за критерієм експлуатаційної (втомної) міцності полягає у забезпеченні загальної міцності судна від багаторазового згину корпусу на хвилеутворенні при дії найбільших експлуатаційних навантажень із забезпеченістю 10^{-5} . Такі експлуатаційні навантаження відповідають зазвичай судну з повним вантажем при 50% запасів від дії хвильової складової згинального моменту M_{wl} і момента на тихій воді M_{swl} (див. п. 2.1.2.2 та 2.1.2.3).

Перевірка міцності зводиться до визначення цим експлуатаційним навантаженням розрахункових напружень при їх зіставленні з допустимими напруженнями і припускає перевірку достатньої працеспроможності (втомної міцності) корпусу судна в умовах багаторазового змінного навантаження. Перевірка при прийнятому стані навантаження судна проводиться окремо для в'язів палуби і днища.

Міцність корпусу враховується достатньою, якщо виконується умова [2, 5]:

$$\sigma = \frac{|k_{wl}M_{wl} + k_{swl}M_{swl}|}{W - \Delta W} \cdot 10^3 \leq \sigma_{\text{л}}, \text{ МПа}, \quad (53)$$

де M_{wl} та M_{swl} – експлуатаційні складові згинального моменту зі своїм знаком на хвилеутворенні та на тихій воді відповідно, кН·м; k_{wl} – коефіцієнт, який враховує вплив високочастотних напружень [5]; W – момент опору корпусу судна на міделі (36), (37) без урахування редуціювання пластин, втрачаючих стійкість; ΔW – зміна моменту опору корпусу судна (за розрахунком еквівалентного бруса) за рахунок корозії метала [5]; k_{swl} – коефіцієнт, який розраховується окремо для розтягнутих і стиснутих в'язів корпусу судна на тихій воді [2].

Поняття граничного моменту було вперше введено академіком Ю.А. Шиманським і до теперішнього часу використовується у світовій практиці.

Граничним моментом $M_{гр}$ називається такий згинальний момент корпусу судна, який визиває появу в найбільш віддаленій в'язі від нейтральної вісі нормальних напружень σ_i , рівних границі плинності σ_s . Найбільш віддаленою в'язею для танкера є верхня кромка палубного стрингера, а для суховантажного судна – поясок комінгс-карлінгса люкового вирізу.

Значення граничного моменту розраховується на основі моделі еквівалентного бруса *другого наближення* з урахуванням можливих втрат стійкості окремими пластинами обшивки чи настилів у складі суднового корпусу. Розрахунок $M_{гр}$ здійснюється окремо на вершині хвилі (ВХ) – перегин судна, і подошві хвилі (ПХ) – прогин судна, за формулою:

$$M_{гр} = \pm \sigma_s \cdot W_{гр}, \text{ МН} \cdot \text{м}, \quad (54)$$

де знак (+) відповідає випадку, коли судно знаходиться на ВХ і можлива втрата стійкості пластин корпусу нижче нейтральної вісі; знак (-) відповідає випадку знаходження судна на ПХ, коли можлива втрата стійкості пластин корпусу вище нейтральної вісі; $W_{гр}$ – граничний момент опору еквівалентного бруса з урахуванням втрати стійкості деяких стиснутих пластин палуби та днища, м^3 ; σ_s – границя плинності матеріалу пластин, МПа.

В обох випадках напруження, які дорівнюють σ_s , слід рахувати такими, що діють в одній і той же найбільш віддаленій в'язі.

Приймається, що при дії $M_{гр}$ розподіл нормальних напружень σ за висотою корпусу судна відповідає лінійному закону (див. рис. 8, в) в рамках виконання гіпотези плоских перерізів. У відповідності з цим, напруження в будь-якій в'язі корпусу при дії $M_{гр}$ визначається формулою $\sigma_i = \frac{z_i}{z_{\max}} \sigma_s$, МПа,

де z_i – відстань i -ї в'язі від нейтральної вісі, м; $z_{\max}$ – відстань найбільш віддаленої в'язі від нейтральної вісі, м.

Положення нейтральної осі поперечного перерізу корпусу приймається за даними розрахунку еквівалентного бруса першого наближення (див. п. 2.1.). Розрахунок напружень в пластинах корпусу судна при дії $M_{\text{гр}}$ проводиться у таблиці (табл. 8). Напруження стискання у пластині $\sigma_{i \text{ ст}}$ (зі знаком “-”) порівнюється з ейлеревими напруженнями σ_e (див. табл. 8). Якщо для цих пластин $|\sigma_i|_{\text{ст}} \leq \sigma_e$, то $M_{\text{гр}} = \sigma_s W_{\text{гр}}$, $W_{\text{гр}} = \frac{I_{\text{н.о.}}}{z_n}$ (у рамках першого наближення, див. п. 2.1).

Таблиця 8 – Розрахунок напружень σ_i від граничного моменту

№ пластины	Найменування пластины	Відстань z_i від н.о., м	σ_i , МПа		σ_e , МПа
			На ВХ	На ПХ	
1	2	3	4	5	6
			$+\sigma_i$	$-\sigma_i$	
			н.о.	н.о.	
			$-\sigma_i$	$+\sigma_i$	

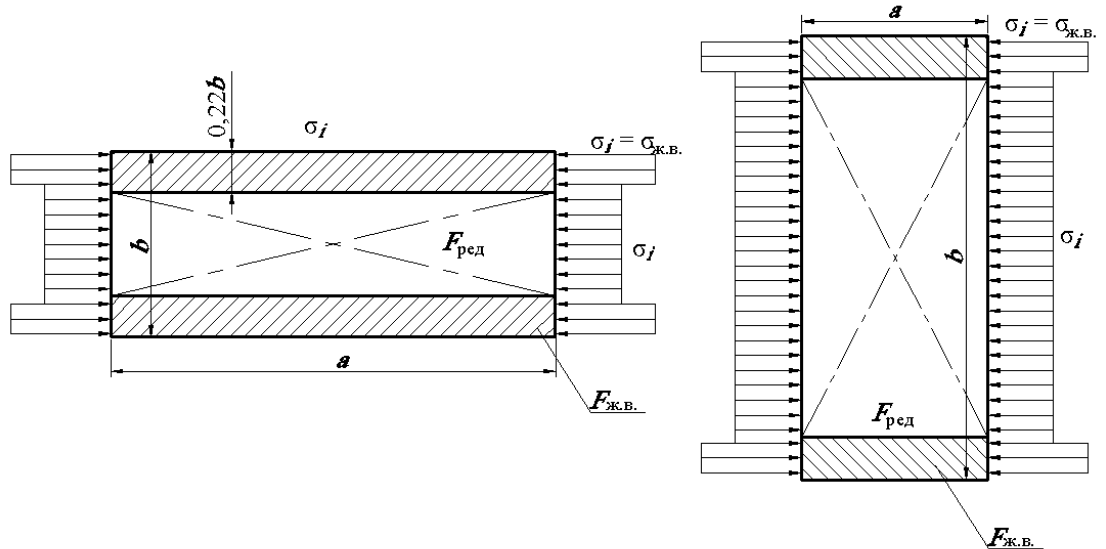
Якщо у деяких пластинах $|\sigma_i|_{\text{ст}} > \sigma_e$, то при дії $M_{\text{гр}}$ необхідно врахувати втрату стійкості цих пластин. Подальшу їх участь в роботі у складі еквівалентного бруса слід вважати за меншою площиною поперечного перерізу, тобто здійснювати *редукцію* таких пластин з *редукційним коефіцієнтом* φ . За пропозицією професора П.Ф. Папковича

$$\varphi = \frac{\sigma_e}{|\sigma_i|_{\text{ст}}}, \quad (55)$$

де σ_e – ейлерові напруження в цих пластинах, МПа.

За допомогою цього коефіцієнта визначається та частина площі поперечного перерізу пластин, які втрачають стійкість і далі працюють у складі еквівалентного бруса з меншою площею поперечного перерізу $F_{\text{ред}}$. Інші частини таких пластин П.Ф. Папковичем рекомендовано відносити до

категорії жорстких в'язів $F_{ж.в.}$ і включати в подальші розрахунки своєю шириною (заштриховані на рис. 12). Тоді в подальшому пластини враховуються в роботу площею $F_{ст}$ при неврахуємій площі ΔF .



$$\begin{aligned}
 F_{ж.в.} &= 0,44bt; \\
 F_{ред} &= 0,56bt; \\
 F_{ст} &= 0,44bt + \varphi F_{ред}; \\
 \text{неврахована площа:} \\
 \Delta F &= F_{ред}(1 - \varphi)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ж.в.} &= 0,44at; \\
 F_{ред} &= bt - 0,44at; \\
 F_{ст} &= 0,44at + \varphi(bt - 0,44at); \\
 \text{неврахована площа:} \\
 \Delta F &= F_{ред}(1 - \varphi)
 \end{aligned}$$

Рис. 12 – Робота втрачених стійкості пластин у подальшому сприйнятті стискування

Так як редукції підлягає незначна частина пластин, то практично зручно визначати не самі геометричні характеристики еквівалентного бруса, а поправки, які визвані редукцією пластин. До них відносяться неврахуємі в розрахунку частини площин перерізів, їх статичні моменти та моменти інерції. Якщо ці поправки відрахувати від геометричних характеристик еквівалентного бруса, визначених у першому наближенні, то отримаємо геометричні характеристики в розрахунку граничного моменту (так зване *друге наближення*). Розрахунок ведеться в табличній формі (табл. 9) окремо для випадків розтягнення палуби (перегин судна) і стискування палуби (прогин судна). В таблицю записують пластини із табл. 5, які втрачають стійкість при $|\sigma_i|_{ст} > \sigma_e$.

Таблиця 9 – Розрахунок поправок до геометричних характеристик еквівалентного бруса

№ пластини	Площа редукації пластини $F_{ред}$, см ²	Відстань від н.о. Z_i , м	Напруження стискування $\sigma_{i ст.}$, МПа	σ_e , МПа	$\varphi = \frac{[5]}{[4]}$	$1 - \varphi$	Неврахована площа [2]·[7]	Статичний момент [3]·[8], см ² ·м	Момент інерції [3]·[9], см ² ·м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
...									
...									
Σ	-	-	-	-	-	-	$\Sigma_1^{гр}$	$\Sigma_2^{гр}$	$\Sigma_3^{гр}$

В стовпці 1-5 заносяться пластини із табл. 5, які втратили стійкість.

Положення нейтральної вісі від дії $M_{гр}$ визначається за формулою:

$$e_{н.в.}^{гр} = \frac{0 - \Sigma_2^{гр}}{\Sigma_1 - \Sigma_1^{гр}}, \text{ м}, \quad (56)$$

де сума Σ_1 взята із табл. 5 розрахунку еквівалентного бруса в першому наближенні.

Граничний момент інерції розглядаємого перерізу корпусу судна відносно нейтральної вісі в граничному стані:

$$I_{н.в.}^{гр} = 2 \left[\frac{1}{2} I_{н.в.} - \Sigma_3^{гр} - e_{н.в.}^2 (\Sigma_1 - \Sigma_1^{гр}) \right], \text{ м}^4, \quad (57)$$

де $I_{н.в.}$ взятий із табл. 5 розрахунку еквівалентного бруса в першому наближенні.

Граничний момент опору поперечного перерізу корпусу судна відносно палуби:

$$W_{п}^{гр} = \frac{I_{н.о.}^{2p}}{Z_{1max}}, \text{ м}^3, \quad (58)$$

де $z_{1max} = z_{max} - e_{н.в.}^{гр}$; z_{max} – відстань для найбільш віддаленої в'язі від нейтральної осі першого наближення, м.

Якщо розрахунковий момент опору $W_{п}^{гр}$ у другому наближенні буде меншим момента опору $W_{п}$ першого наближення більш ніж на 10%, то необхідно зробити ще одне наближення для визначення $W_{п}^{гр}$.

Для цього необхідно розрахувати нові значення напружень

$$\sigma_i = \frac{z_i}{z_{i\max}} \sigma_s, \quad (59)$$

і заповнення таблиці 9.

При цьому z_i відраховується від нового положення нейтральної осі. На підставі таблиці встановлюються пластини, які втрачають стійкість і заносяться у таблицю 9 з розрахунку нових редуційних коефіцієнтів ϕ_1 у стовпець 6. В стовпець 7 записуються значення $(\phi - \phi_1)$. Інші обчислення аналогічні зазначеним вище.

В результаті обчислення моментів опору перерізу корпусу судна для випадків прогину і перегину судна визначають *граничний згинальний момент*:

- при стисканні палуби (прогин судна): $M_{\text{гр}} = -\sigma_s W_{\text{п}}^{\text{гр}}, \text{ МН} \cdot \text{м};$
- при розтягуванні палуби (перегиб судна): $M_{\text{гр}} = \sigma_s W_{\text{п}}^{\text{гр}}, \text{ МН} \cdot \text{м}.$

Перевірка загальної міцності за граничним станом на згин здійснюється при дії на корпус судна максимально можливої за абсолютною величиною суми розрахункових значень хвильової складової згинального моменту M_{w2} , складовою ударного моменту M_F від удара судна о хвилю, а також згинального моменту на тихій воді M_{sw} при прогині та перегині судна на подошві та вершині хвилі.

При дії екстремальних навантажень із забезпеченістю 10^{-8} перевірка за граничним станом на згин полягає в оцінці співвідношення між цими навантаженнями та їх граничною (небезпечною) величиною, яку може витримати корпус судна. Тобто має місце перевірка забезпечення необхідних запасів несучої спроможності корпусу в екстремальних умовах.

Перевірка здійснюється для станів навантаження судна з повним вантажем зі 100% запасів і судна в баласті з 50% запасів на ВХ та ПХ за умовою:

$$k_{\phi} = \frac{|M_{\text{гр}}|}{|M_{w2} + M_F + M_{sw2}|} \geq k_{\min} \cdot k_K. \quad (60)$$

У формулі позначено: k_{ϕ} – фактичний коефіцієнт запасу міцності корпусу судна за згином, $M_{\text{гр}}$ – граничний згинальний момент (54); M_{w2} – величина найбільшого хвильового моменту (див. п. 2.1.2.3); M_F – ударна (динамічна) складова згинального моменту (див. п. 2.1.2.3); M_{sw2} – величина згинального моменту на тихій воді, яка дає максимальне за модулем значення сумарного згинального моменту; при перегині судна на верхівці хвилі M_{w2} і M_F та M_{sw2} додатні (“+”), при прогині на підшві хвилі – від’ємні (“-”); $k_{\min}$ – мінімальний коефіцієнт запасу, рівний 1,15 – при прогині, 1,25 – при перегині корпусу судна; $k_K = 1$ при прогині судна на тихій воді для перегинаючих моментів $k_K = 0,9 + \frac{M_{sw2}}{M_{sw}^*} \geq 1$; $M_{sw}^* = 0,076k_C W_0$, кН·м;

$k_C = 1,05 - \frac{2425}{L^2 + 8530} \leq 1$; $W_0 = C_w B L^2 (C_B + 0,7)$ – нормативний момент опору, см³, (B, L – відповідно ширина та довжина судна, м).

Перевірка загальної міцності корпусу судна за граничним станом на зріз полягає у зіставленні абсолютної величини максимальних значень сумарної зрізуючої сили на хвилі утворенні і тихій воді з її граничним значенням:

$$k_{\phi} = \frac{N_{\text{гр}}}{|N_w + N_{sw2}|} \geq 1,2, \quad (61)$$

де k_{ϕ} – фактичний коефіцієнт запасу міцності за зсувом; N_w – хвильова зрізуюча сила від дії зовнішнього навантаження, кН; N_{sw} – максимально можлива в розглядаємому перерізі зрізуюча сила від навантаження на тихій воді, кН; $N_{\text{гр}}$ – гранична зрізуюча сила в розглядаємому перерізі корпусу, кН.

За формулою (61) здійснюється перевірка для судна з повним навантаженням зі 100% запасів і судна в баласті з 50% запасів на ВХ та ПХ. Приймається, що положення поперечного перерізу корпусу судна за довжиною судна у перерізі з координатою x для хвильової складової зрізуючої сили $N_w = N_w(x)$ – відповідає положенню перерізу від дії зрізуючої сили на тихій воді $N_{sw} = N_{sw}(x)$.

Значення сил N_w та N_{sw} у формулі (61) обираються зі своїми знаками (“+”) або (“-”). Але результат сумарної зрізуючої сили використовується на практиці за абсолютною величиною.

Гранична зрізуюча сила N_{rp} в розглядаємому поперечному перерізі корпусу судна розраховується за формулою:

$$N_{rp} = 0,05\sigma_s\Omega, \text{ кН}, \quad (62)$$

де σ_s – величина границі плинності матеріалу корпусу, МПа; Ω – сумарна величина площі поперечних вертикальних (поздовжніх) в’язів корпусу (обшивки бортів, листи поздовжніх переділок) з урахуванням великих вирізів (лацпорти та інше), см^2 .

З РОЗРАХУНОК МІСЦЕВОЇ МІЦНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ДНИЩОВОГО ПЕРЕКРИТТЯ СУДНА

3.1 Навантаження від дій води

Розрахунковий тиск p від дії води на елементи днищових конструкцій корпусу судна визначається за Нормами міцності та Правилами Регістру [1, 2, 10] за формулою:

$$p = p_{st} + p_w, \text{ кПа}, \quad (63)$$

де p_{st} – статичний тиск, який дорівнює для днищової пластини величини

$$p_{st} = \rho g d, \text{ кПа}; \quad (64)$$

$\rho = 1,02 \text{ т/м}^3$ – густина морської води; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; d – осідання судна на рівні перевіряємих на міцність елементів днищового перекриття, м; p_w – тиск за рахунок хвилеутворення при хитавиці

$$p_w = \rho g \frac{h_1}{2} a_v a_x, \text{ кПа}, \quad (65)$$

де h_1 – висота хвилі в екстремальних умовах, яка визначається за формулами [10]:

$$\begin{aligned} h_1 &= k_C \cdot c_w, \text{ м}; \\ k_C &= 1,05 - \frac{2425}{L^2 + 8530} \leq 1; \\ c_w &= 10,75 - \frac{(300 - L)^2}{100} \leq 10,75; \end{aligned} \quad (66)$$

a_v, a_x – параметри хитавиці, які розраховуються за наближеними залежностями:

$$a_v = 0,8 \frac{v_0}{\sqrt{L}} \left(\frac{L}{10^3} + 0,4 \right) + 1,5; \quad (67)$$

$$a_x = k_x \left(1 - \frac{2x_{II}}{L} \right) \geq 0,267; \quad (68)$$

В формулах (67) та (68) прийняті позначення:

v_0 – задана швидкість судна на тихій воді, вузлів;

L – довжина судна між перпендикулярами, м;

x_{II} – відстань від центру поля пластини до найближчого перпендикуляра (носового чи кормового), м;

$k_x = 1,25$ – для пластин в ніс від міделя; $k_x = 0,75$ – для пластин в корму від міделя.

3.2 Перевірка місцевої міцності днищового ребра жорсткості

Поздовжнє днищове ребро жорсткості являє собою багатопрогонну балку, яка завантажена рівномірно розподіленим навантаженням. Прогин балки відповідає відстанню між її центрами для ненавантаженого та завантаженого станами, а навантаження визначається розрахунковим тиском води.

Через симетрію конструкції та навантаження ребра жорсткості довжиною b (м) слід розглядати як однопрогонну жорстко затиснену балку (рис. 13) з рівномірним навантаженням інтенсивністю

$$q = p \cdot a, \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}, \quad (69)$$

де a – відстань між поздовжніми балками днищового набору, см; p – розрахунковий тиск, $\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \left(1 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = \frac{1}{10} \text{МПа} \right)$.

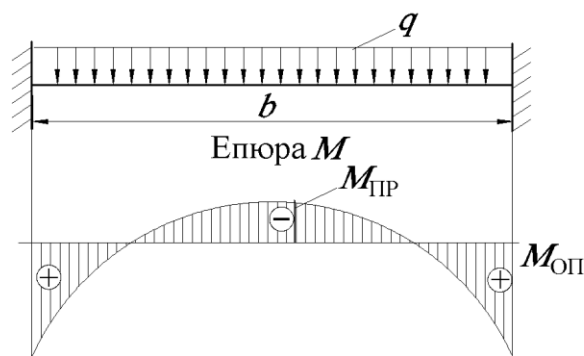


Рис. 13 – Розрахункова схема днищового ребра жорсткості в оцінці його міцності

Перевірка міцності ребра жорсткості здійснюється за нормальними напруженнями $\sigma_{\max}$ в місці дії найбільшого згинаючого моменту у затисненні балки $M_{\text{ОП}}$:

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{оп}} &= \frac{qb^2}{12}, \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ M_{\text{пр}} &= \frac{qb^2}{24}, \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ \sigma_{\text{max}} &= 10 \frac{M_{\text{оп}}}{W} \leq \sigma_{\text{доп}}, \text{ МПа} \end{aligned} \right\}, \quad (70)$$

де W – момент опору поперечного перерізу ребра жорсткості з приєднаним пояском, см^3 (див. табл. 6); $\sigma_{\text{доп}}$ – допустиме напруження, яке за вимогами Норм міцності [2] дорівнює

$$\sigma_{\text{доп}} = k_{\sigma} \sigma_{\text{Т}}^{\text{н}}, \quad (71)$$

де $\sigma_{\text{Т}}^{\text{н}}$ – нормативна межа плинності за нормальними напруженнями в МПа, що визначається як

$$\sigma_{\text{Т}}^{\text{н}} = k_{\text{н}} \cdot R_{\text{ЕН}}; \quad k_{\text{н}} = \frac{1}{1 + 0,16 \left(\frac{R_{\text{ЕН}}}{235} - 1 \right)^{\frac{3}{2}}}, \quad (72)$$

де $R_{\text{ЕН}}$ – межа плинності матеріалу за довідковими даними в МПа; k_{σ} – коефіцієнт допустимих напружень, який для поздовжніх балок днища дорівнює $k_{\sigma} = 0,6$.

При порушенні умови (70) треба прийняти ребра жорсткості більшого розміру.

3.3 Перевірка місцевої міцності днищової пластини

Днищові пластини зовнішньої обшивки завантажені рівномірним тиском з боку води і розглядаються жорстко закріпленими на опорному контурі (флорах і ребрах жорсткості) в силу симетрії за конструкцією і навантаженням (рис. 14).

Для практичних розрахунків міцності пластин використовуються прості залежності для елементів згинання, які мають вигляд [3, 5, 9, 10]:

- для *прогину* в центрі пластини (т. 1 на рис. 14):

$$w_1 = k_1 \frac{p \cdot b^2}{E \cdot t^3}, \text{ см}, \quad (73)$$

де k_1 – коефіцієнт, який залежить від виду навантаження, співвідношення сторін пластини $\gamma = \frac{a}{b}$ і граничних умов [7, 9]; p – розрахунковий тиск на пластину, $\frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$; $E = 2,1 \cdot 10^4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$ – модуль пружності матеріалу пластини (сталь); b, t – ширина та товщина пластини, см;

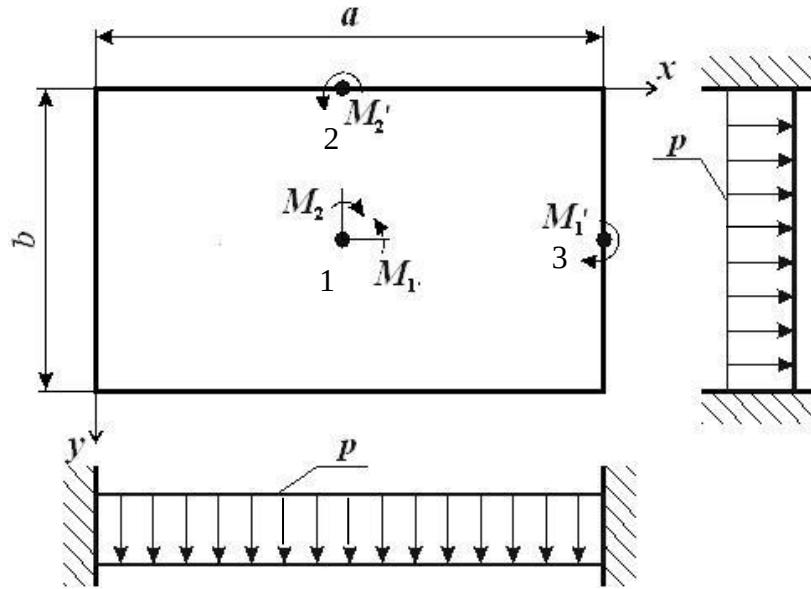


Рис. 14 – Розрахункова схема днищової пластини в оцінці її міцності

- *максимальне нормальне напруження для пластини при її згинанні*, яке виникає посередині більшої сторони пластини a (т. 2, рис. 14):

$$\sigma_{\max} = \frac{6M'_2}{t^2} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (74)$$

де M'_2 – найбільший згинальний момент посередині більшої сторони пластини a в перерізі, перпендикулярному осі x :

$$M'_2 = k_4 p b^2, \text{ кН}; \quad (75)$$

де k_4 – коефіцієнт, який обирається із довідкових таблиць [7, 9] і залежить від виду навантаження, співвідношення сторін пластин γ і граничних умов; b – довжина меншої сторони пластини, см.

Перевірка міцності пластини при її згинанні від зовнішнього навантаження здійснюється за умовою міцності $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}}$, де $\sigma_{\text{доп}}$ визначається за залежністю (71), в якій коефіцієнт k_σ згідно Норм міцності [2] для пластин днища приймається за табл. 10:

Таблиця 10 – До визначення коефіцієнта k_{σ} [11]

Система набору	Днище	
	Середня частина (0,25L в ніс і корму)	Кінцевості (0,1L від носа або корми)
Поздовжня	1,1	1,2
Поперечна	0,8	1,2

Якщо умова міцності (74) не виконується, то необхідно збільшити товщину днищової обшивки до стандартної величини, яка забезпечить її виконання.

Список літератури

1. Правила класифікації та побудови суден. Київ: Регістр судноплавства України. 2020. 443 с.
2. Нормы прочности морских судов. Ленинград: Регистр СССР. 1991. 91 с.
3. *Лугінін О.Є., Терлич С.В.* Методичні вказівки до курсового та дипломного проектування з розрахунку загальної та місцевої міцності корпусу судна. Херсон: Книжкове видавництво «ФОП Вишемирський В.С.». 2020. 12 с.
4. *Телегина И.А.* Общая и местная прочность судов: методические указания по курсовому проектированию. Николаев: НКИ, 1987. 52 с.
5. *Телегина И.А.* Прочность судов: учебное пособие. Николаев: НКИ, 1989. 83 с.
6. *Сердюченко А.М., Лугінін О.Є., Коршиков Р.Ю.* та ін. Основи теорії пружності, будівельної механіки, міцності та вібрації суден: навчальний посібник. Миколаїв: НУК, 2012. 424 с.
7. Справочник по строительной механике корабля. В 3-х т. Под общ. ред. акад. Ю.А. Шиманского. Ленинград: Судпромгиз, 1958. – Т2 – 528 с.
8. *Лугінін О.Є., Дудченко О.М.* Розрахунок загального вигину корпусу судна на тихій воді на персональному комп'ютері: методичні вказівки до курсового та дипломного проектування. Миколаїв: НУК. 2007. 28 с.
9. *Кочанов Ю.П., Телегина И.А.* Устройство стержней и стержневых систем. Изгиб и устойчивость пластин: методические указания . Николаев: НКИ, 1990. 40 с.
10. *Коростылев Л.И., Клименков С.Ю.* Методические указания к расчётам прочности и устойчивости элементов судового набора. Николаев: НУК, 2012. 6 с.
11. *Лугінін О.Є., Дудченко О.М.* Розрахунок міцності днищових перекриттів на ПК: методичні вказівки до курсового та дипломного проектування. Миколаїв: НУК. 2007. 32 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Вихідні дані для перевірки загальної міцності корпусу судна в курсовій роботі

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Кафедра суднобудування та ремонту суден

ЗАВДАННЯ

на курсову роботу за темою «Розрахунок загальної та місцевої міцності корпусу судна» з дисципліни Будівельна механіка корабля

Студент гр. _____
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Виконати перевірку загальної міцності корпусу судна у міделевому перерізі та місцевої міцності днищового перекриття

Розділи курсової роботи	Строки виконання (тиждень)
Вступ	
1 Розрахунок згинальних моментів 1.1 Вибір розрахункових станів навантаження судна. Складання та обчислення таблиць вагового навантаження. 1.2 Розрахунок згинальних моментів на тихій воді. 1.3 Розрахунок хвильового та ударних моментів.	5-6
2 Розрахунок еквівалентного бруса 2.1 Складання розрахункового перерізу. Обчислення геометричних характеристик еквівалентного бруса в першому наближенні. 2.2 Розрахунок стійкості перекриття верхньої палуби. 2.3 Розрахунок стійкості поздовжнього набору та пластин, що входять до еквівалентного бруса.	7-8
3 Перевірка загальної міцності корпусу судна 3.1 Перевірка загальної міцності за Правилами Регістру судноплавства. 3.2.1 Визначення розрахункової величини моменту опору W і моменту інерції I міделєвого перерізу корпусу судна. 3.2.2 Зіставлення розрахункових і фактичних значень W та I . 3.3 Загальна характеристика перевірок загальної міцності за Нормами міцності для морських суден.	9-10
4 Розрахунок місцевої міцності елементів днищового перекриття судна 4.1 Перевірка міцності поздовжніх ребер жорсткості перекриття. 4.2 Перевірка міцності днищових пластин перекриття.	11-12
Висновки	

Завдання видане «__» _____ 20__ р

Керівник роботи _____

$L = \underline{\hspace{2cm}}$ м; $B = \underline{\hspace{2cm}}$ м; $D = \underline{\hspace{2cm}}$ м; $h_{TB} = \underline{\hspace{2cm}}$ м; $\Delta = \underline{\hspace{2cm}}$ кН; $v_s = \underline{\hspace{2cm}}$ вузлів; $\sigma_s = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа

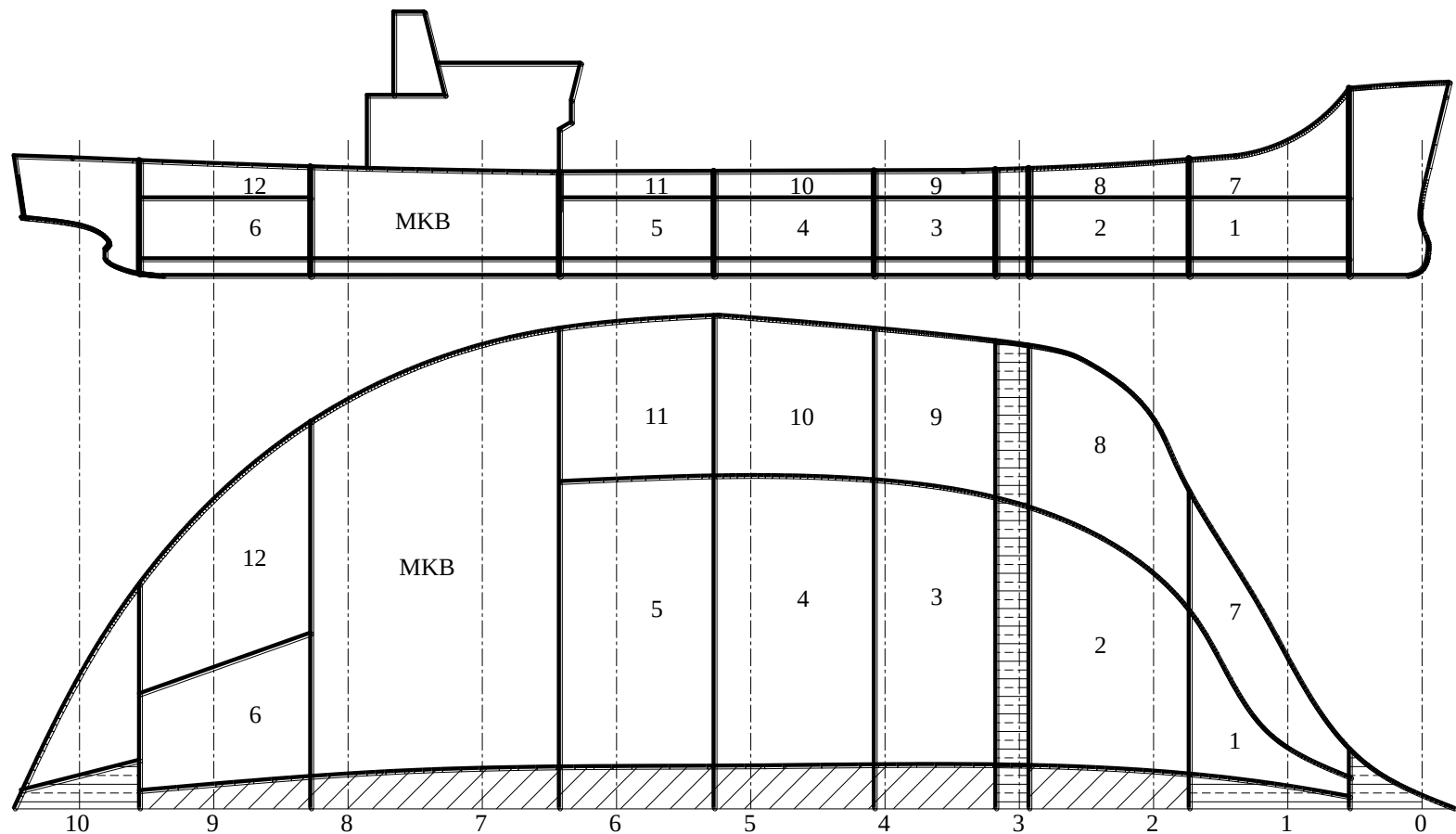


Рис. А1 – Епюра ємностей

Таблиця А1 – Вагове навантаження

Статті навантаження		Відносне навантаження статті	Навантаження статті, кН	Відносний розподіл статей навантаження за шпациями									
				0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Порожнє судно				0,033	0,056	0,098	0,108	0,108	0,108	0,108	0,185	0,104	0,092
Вантаж				0,033	0,118	0,158	0,154	0,159	0,179	0,062	-	0,085	0,052
Запаси				-	-	0,048	0,050	0,052	0,052	0,120	0,346	0,182	0,150
Баласт				0,120	0,143	0,153	0,163	0,173	0,022	0,022	0,024	0,030	0,150

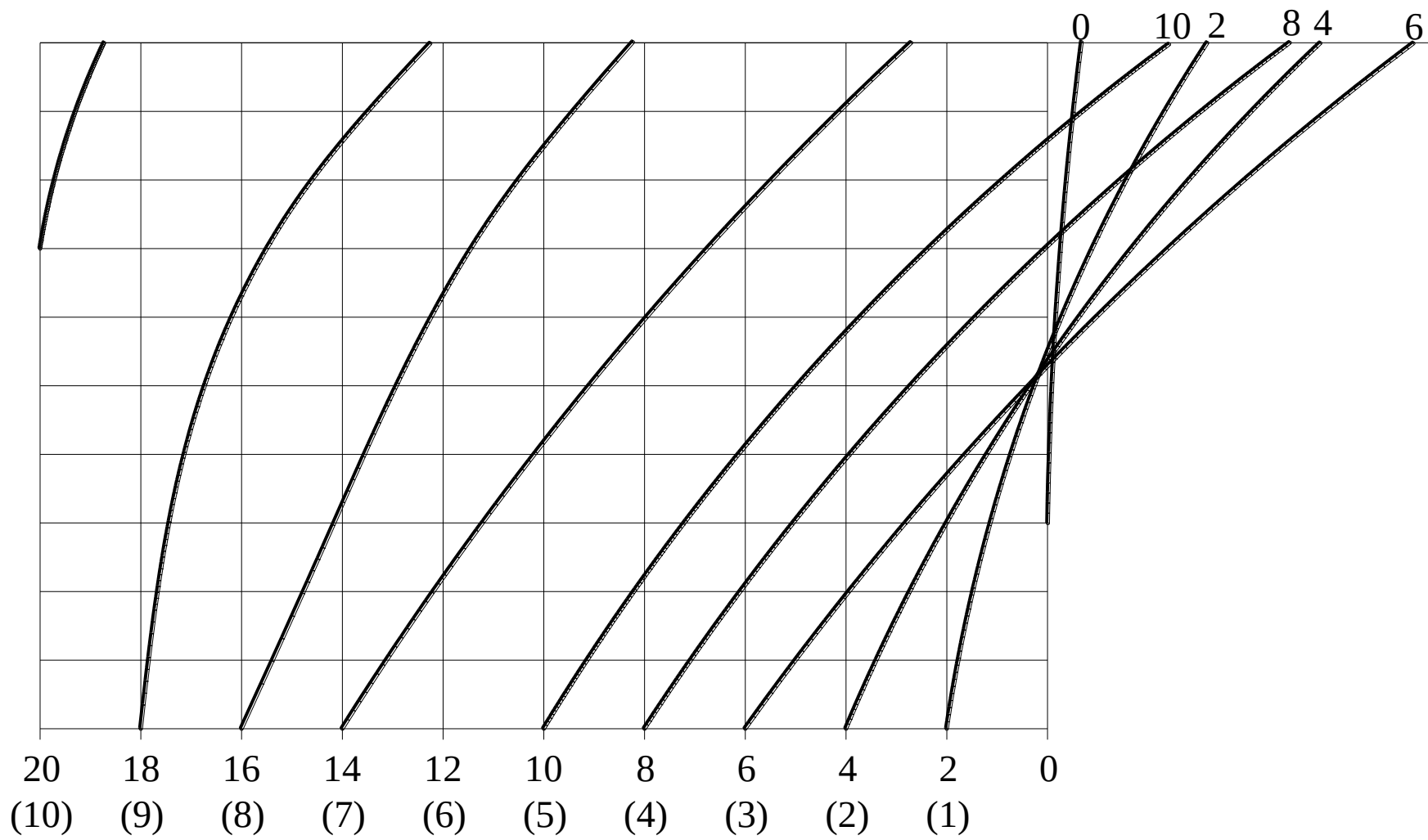
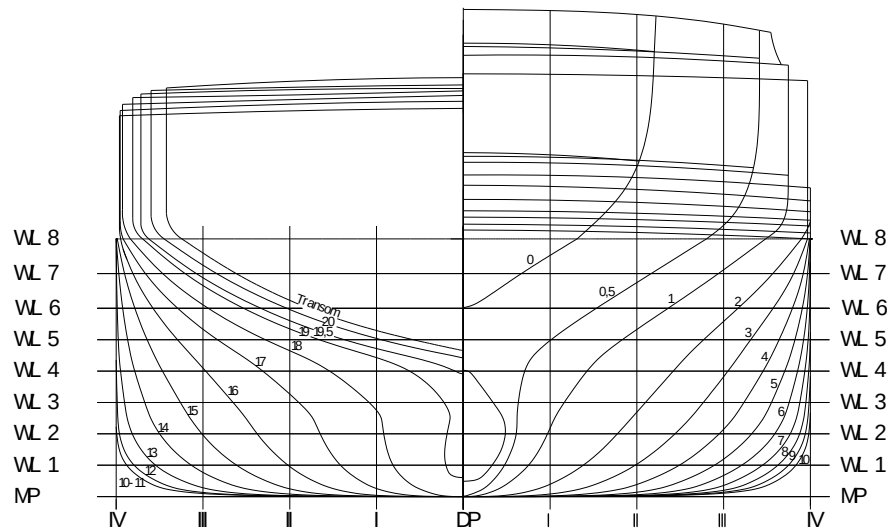


Рис. А2 – Масштаб Бонжана



Таблиця А2 – Характеристика набору корпусу судна

Позначення	Розміри		Позначення	Розміри	
Товщина листів	$\delta 1$		Балки набору	Б1	
	$\delta 2$			Б2	
	$\delta 3$			Б3	
	$\delta 4$				
	$\delta 5$		Шпація	S	
Поздовжні ребра жорсткості	P1		Флори через 3 шпації		
	P2				
	P3				
	P4				

Рис. А3 – Теоретичне креслення (проекція «корпус») та набір корпусу судна

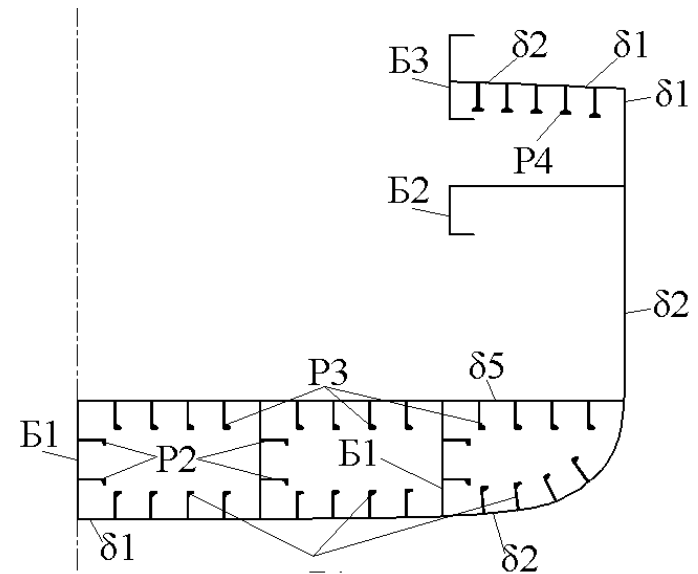


Рис. А4 – Конструктивний мідель-шпангоут

ДОДАТОК В
Вихідні дані для розрахунку на ПК загального згину корпусу
судна на тихій воді та приклад розрахунку за допомогою
програми для ПК LS-17

Зразок бланку завдання для програми LS-17

Студент гр. _____ Прізвище, ініціали

Довжина судна DL ... м

Осідання судна на міделі T ... м

Ширина судна B ... м

Кількість теоретичних шпангоутів n ...

Висота борта H ... м

Питома вага води GA ... кН/м^{**}З

Площі шпангоутів на рівні КВЛ ОМ1, м²

$\omega_n^{КВЛ}$; $\omega_{n-1}^{КВЛ}$; $\omega_{n-2}^{КВЛ}$; ; $\omega_1^{КВЛ}$; $\omega_0^{КВЛ}$

(n = 11 для курсової роботи; n = 21 для дипломної роботи)

Площі шпангоутів на рівні ВП ОМ2, м²

$\omega_n^{ВП}$; $\omega_{n-1}^{ВП}$; $\omega_{n-2}^{ВП}$; ; $\omega_1^{ВП}$; $\omega_0^{ВП}$

Навантаження на шпацию за станами P, кН

P_{n-1} ; P_{n-2} ; P_{n-3} ; P_2 ; P_1 (судно зі 100% вантажу і 100% запасів)

P_{n-1} ; P_{n-2} ; P_{n-3} ; P_2 ; P_1 (судно зі 100% вантажу і 50% запасів)

P_{n-1} ; P_{n-2} ; P_{n-3} ; P_2 ; P_1 (судно в баласті з 50% запасів)

Підпис викладача _____

Приклад розрахунку за комп'ютерною програмою LS-17 в курсовій роботі

***** ПРОГРАММА LS 17 *****

Группа 4111 СПИЛЬНИЙ В.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ НА ТИХОЙ ВОДЕ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Длина судна DL, м	150.00	Осадка судна на миделе T, м	7.20	
Ширина судна B, м	19.90	Кол-во теор. шпангоутов N	11	
Высота борта H, м	12.20	Удельный вес воды GA, кН/м**3	10.05	
Площади шпангоутов на уровне ГВЛ OM1, м**2				
2.000	37.500	79.100	111.600	131.900
142.100	136.000	119.700	82.200	35.500
.000				
Площади шпангоутов на уровне ВП OM2, м**2				
32.400	94.400	158.300	203.000	230.400
239.500	236.500	213.100	156.300	71.000
6.100				
Нагрузки на шпацию P, кН				
6762.000	11014.000	16059.000	21303.000	23904.000
23707.000	21633.000	17871.000	11531.000	5217.000

Результаты расчётов

Весовое водоизмещение судна $D = 159001$. (кН)
 Абсцисса центра тяжести судна $XG = -.020$ (м)
 Объемное водоизмещение судна $V = 15823$. (м**3)
 Абсцисса центра тяжести судна $XC = -.032$ (м)

Погруженные площади шпангоутов WS, м**2				
8.638	50.173	97.084	132.752	155.123
165.488	160.569	142.940	100.960	44.642
1.597				

Осадка носом TH = 8.51 (м)

Осадка кормой TK = 8.29 (м)

Номер теоретического шпангоута	Перерезывающие силы, кН	Изгибающие моменты, кН*м
10	0	0
9	2330	17389
8	2247	51606
7	983	75695
6	590	87331
5	329	94035
4	-538	92252
3	-1780	74619
2	-2291	43809
1	-1733	13324
0	0	0

Проверка:

$N(0.5L)/NMAX = .00$

$M(0.5L)/MMAX = .01$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ
НА ТИХОЙ ВОДЕ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Вариант загрузки N 2

Нагрузки на шпацию Р, кН

6620.000	10380.000	13609.000	20149.000	22248.000
22080.000	20628.000	17218.000	11352.000	5217.000

Результаты расчётов

Весовое водоизмещение судна $D = 149501$. (кН)

Абсцисса центра тяжести судна $XG = .677$ (м)

Объемное водоизмещение судна $V = 14876$. (м³)

Абсцисса центра тяжести судна $XC = .671$ (м)

Погруженные площади шпангоутов WS, м²

4.909	43.643	88.623	123.712	146.162
157.399	153.020	136.665	96.569	42.820
1.333				

Осадка носом TH = 8.29 (м)

Осадка кормой TK = 7.68 (м)

Номер теоретического шпангоута	Перерезывающие силы, кН	Изгибающие моменты, кН*м
10	0	0
9	2960	22106
8	3371	69459
7	976	101995
6	783	115081
5	150	121974
4	-1166	114237
3	-2373	87562
2	-2735	49121
1	-1889	14305
0	0	0

Проверка:

$N(0.5L)/NMAX = .00$

$M(0.5L)/MMAX = .01$

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ СИЛ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ
НА ТИХОЙ ВОДЕ**

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Вариант загрузки N 3

Нагрузки на шпацию Р, кН

3686.000	7809.000	14428.000	6222.000	6738.000
7286.000	5910.000	5069.000	3989.000	3129.000

Результаты расчётов

Весовое водоизмещение судна D = 64266. (кН)

Абсцисса центра тяжести судна XG = -9.212 (м)

Объемное водоизмещение судна V = 6395. (м**3)

Абсцисса центра тяжести судна XC = -9.199 (м)

Погруженные площади шпангоутов WS, м**2

1.678	28.821	55.239	70.097	73.585
69.296	56.770	41.559	22.767	7.339
0.000				

Осадка носом TH = 5.98 (м)

Осадка кормой ТК = 6.04 (м)

Номер теоретического шпангоута	Перерезывающие силы, кН	Изгибающие моменты, кН*м
10	0	0
9	1387	10225
8	2860	41901
7	7841	121980
6	3233	204856
5	-798	222934
4	-3014	194155
3	-4516	137492
2	-5295	71222
1	-2575	19875
0	0	0

Проверка:

N(0.5L)/NMAX = .00

M(0.5L)/MMAX = .00

ДЛЯ НОТАТОК

Навчальне видання

Лугінін Олег Євгенович, к.т.н., професор НУК;
Дудченко Олег Миколайович, к.т.н., професор НУК;
Терлич Станіслав Володимирович, к.т.н.

Розрахунок загальної та місцевої міцності корпусу судна
Методичні вказівки до курсового і дипломного проєктування з
дисципліни «Будівельна механіка корабля»

.....