

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**О. В. ЩЕДРОЛОСЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО,
Г. В. КОНОВАЛОВА, В. В. СОЦЕНКО**

ХИТАВИЦЯ КОРАБЛЯ

Навчальний посібник

Рекомендовано Вченою радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2023

Автори:

О. В. Щедролюсєв, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

О. В. Бондаренко, кандидат технічних наук, професор, директор Кораблебудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Г. В. Коновалова, кандидат технічних наук, доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

В. В. Соценко, викладач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Рецензенти:

В. О. Некрасов, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, завідувач кафедри теорії та проектування суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

А. В. Букетов, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії

*Рекомендовано Вченою радою НУК ім. адм. Макарова
(протокол № 5 від 28.05.2021 р.)*

Хитавиця корабля : навчальний посібник / О. В. Щедролюсєв,
X52 О. В. Бондаренко, Г. В. Коновалова, В. В. Соценко. – Миколаїв : НУК,
2023. – 140 с.

ISBN 978-966-321-458-0

Наука про хитавицю корабля опирається на знання в галузі математики, механіки твердих тіл, гідромеханіки, аеродинаміки, статички корабля. Вона є однією з найскладніших для сприйняття студентами дисциплін з теорії корабля і кораблебудівних наук загалом.

Посібник розраховано для вивчення дисциплін «Динаміка корабля» та «Техніка і технології освоєння океану», «Океанотехніка», «Основи проектування суден», а також для виконання практичних робіт і курсових проєктів (робіт), кваліфікаційних робіт першого (бакалаврського) рівня вищої освіти студентами спеціальності 135 «Суднобудування» освітніх програм «Кораблі та океанотехніка», «Суднокорпусобудування», «Судноремонт і технічне обслуговування флоту», «Яхти та судна для водного туризму».

Призначено для студентів спеціальності 135 «Суднобудування», а також для студентів інших спеціальностей, які вивчають теорію корабля або прикладні дисципліни, що містять питання динаміки морських плавучих споруд. Також може бути корисним для працівників суднобудівної та судноремонтної галузей, аспірантів, слухачів і викладачів морських навчальних закладів.

УДК 629.12.011

© Щедролюсєв О. В., Бондаренко О. В.,
Коновалова Г. В., Соценко В. В., 2023

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2023

ISBN 978-966-321-458-0

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ПОЛОЖЕННЯ ТА ГІПОТЕЗИ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ.....	7
1.1 Предмет і завдання дисципліни.....	9
1.2 Історія розвитку науки про хитавицю суден.....	10
2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ХВИЛЬ.....	15
2.1 Характеристики регулярного хвилювання.....	16
2.2 Характеристики нерегулярного хвилювання.....	21
3 ЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ.....	29
3.1 Системи координат. Види хитавиці.....	29
3.2 Класифікація сил, які діють на корабель при хитавиці.....	32
3.3 Загальна система рівнянь лінійної хитавиці корабля.....	35
3.4 Хитавиця корабля на тихій воді.....	37
3.5 Лінійна теорія хитавиці корабля, розташованого лагом до хвилювання.....	41
3.6 Розв’язок рівнянь хитавиці корабля на нерегулярному хвилюванні.....	48
4 ЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ.....	56
4.1 Види рівнянь поздовжньої хитавиці корабля на тихій воді.....	57
4.2 Урахування швидкості ходу на поздовжню хитавицю корабля на тихій воді.....	63

4.3 Рівняння поздовжньої хитавиці корабля на зустрічному хвилюванні без швидкості ходу.....	64
4.4 Рівняння поздовжньої хитавиці корабля, який рухається на зустрічному хвилюванні.....	66
4.5 Розрахунки та побудова кривих залиття.....	69
5 ЗАХОДИ БОРОТЬБИ ЗІ ШКІДЛИВИМИ НАСЛІДКАМИ ХИТАВИЦІ.....	72
5.1 Вплив швидкості ходу та курсу корабля на хитавицю.....	73
5.2 Заспокоювачі хитавиці корабля.....	81
6 ПРИКЛАДНІ РОЗРАХУНКИ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ....	92
6.1 Експериментальні методи вивчення хитавиці.....	92
6.2 Визначення характеристик бортової хитавиці корабля при обробці записів вільних загасаючих коливань.....	104
6.3 Розрахунки бортової хитавиці корабля, розташованого лагом до хвилювання.....	111
6.4 Прикладні розрахунки параметрів хитавиці корабля під час експлуатації.....	128
6.5 Задачі для самостійного розв'язання.....	132
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	136

ВСТУП

Посібник розраховано для вивчення дисциплін «Динаміка корабля», «Техніка і технології освоєння океану», «Океанотехніка», «Основи проектування суден», а також для виконання практичних робіт та курсових проєктів (робіт), кваліфікаційних робіт першого (бакалаврського) рівня вищої освіти студентами спеціальності 135 «Суднобудування» для освітніх програм «Кораблі та океанотехніка», «Суднокорпусобудування», «Судноремонт і технічне обслуговування флоту», «Яхти та судна для водного туризму». Посібник також може бути корисним для працівників суднобудівної та судноремонтної галузей, магістрантів, аспірантів, слухачів і викладачів морських навчальних закладів.

Сучасні методи дослідження та розрахунку остійності, хитавиці, ходовості, керованості, загальної та місцевої міцності ґрунтуються на достовірних даних про гідро- та аеродинамічні сили, які діють на судно з боку водно-повітряної середовища та у свою чергу викликані вітром і хвилями.

Мета даного посібника – систематично викласти матеріал, необхідний для обґрунтованого підходу до оцінювання та характеризувати основних параметрів динаміки корабля.

Більша частина даних, які наведено в посібнику, отримана за останні десятиліття завдяки широкому використанню ймовірнісних та спектральних методів дослідження

параметрів руху рідин та повітря. Такі дослідження продовжуються і в наш час. Ці обставини не могли не відобразитись на характері викладання матеріалу, особливо відомостей про кількісну сторону явищ: у тих випадках, коли загальноприйняті закономірності відсутні, підкреслювався характер отриманих результатів із посиланням на оригінальне першоджерело. Що ж стосується необхідних відомостей з теорії ймовірності та випадкових функцій, то їх введено по мірі необхідності в основний матеріал, що, на думку авторів, впливає на більш швидке засвоєння основних положень.

Головна трудність при написанні посібника полягала у тому, що послідовно викладаючи значно обмежений та вузьконаправлений матеріал, з одного боку, не сильно заглиблюватися у деталі, які більш корисні для фахівців з судноводіння й океанографії та не мають істотного значення для морехідності корабля. З іншого ж боку – автори ставили за мету пов'язати між собою окремі конкретні кількісні характеристики вітру, хвиль та корпусу корабля.

Крім того, намагаючись не дублювати теми з курсів «Гідроаеромеханіка» та «Гідробіоніка для суднобудівників», автори у можливих межах скоротили викладення класичної теорії поверхневих хвиль для ідеальної рідини, обмежившись постановкою задач та описом лише тих результатів їх розв'язків, які безпосередньо використовуються у розрахунках спектральної теорії морських хвиль.

Вступ, розділи 2–3 написані *Щедролосєвим О.В.*, **розділ 4** – *Бондаренком О.В.*, **розділи 1, 5** – *Коновалою Г.В.*, **розділ 6** – *Соценком В.В.*

Автори висловлюють подяку рецензентам за цінні поради та зауваження при обговоренні змісту посібника.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ПОЛОЖЕННЯ ТА ГІПОТЕЗИ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ

Хитавиця корабля є розділом дисципліни «Динаміка корабля», який викладається для студентів спеціальності 135 «Суднобудування».

Хитавицею називають *гармонійні коливальні рухи корабля як абсолютно твердого тіла при плаванні його на поверхні (або для підводних апаратів під поверхнею) спокійної або схвильованої води.*

Хитавиця корабля – явище негативне, тому морехідною якістю в цьому випадку буде плавність хитавиці.

Хитавицю корабля можуть супроводжувати наступні негативні явища [1]:

1) перекидання внаслідок надмірних нахилень при бортовій хитавиці або внаслідок значної втрати остійності;

2) перелом корпусу внаслідок вигину при кільовій хитавиці;

3) місцеві руйнування обшивки корпусу, руйнування крильчастих систем для суден на підводних крилах або гнучкого огороження для суден на повітряній подушці і т. п. під дією сил інерції та ударів хвиль;

4) порушення нормальної роботи пристроїв і механізмів унаслідок дії сил інерції, заливання палуби;

5) переміщення недостатньо закріплених вантажів, насипних вантажів унаслідок великих нахилень і впливу сил інерції;

- 6) порушення роботи рушіїв і засобів керованості;
- 7) морська хвороба пасажирів і команди, порушення нормальної роботи команди;
- 8) утруднення, а іноді й неможливість виконання кораблем функцій, для яких він призначений (вантажні операції для плавучих кранів і кранових суден; торпедна, ракетна й гарматна стрільби для військових кораблів; бурові роботи для плавучих бурових установок; промислові роботи для риболовних суден тощо).

Математичний опис хитавиці дозволяє визначити характер поведінки корабля в умовах хвилювання, врахувати її негативні наслідки та розробити заходи щодо їхнього запобігання. Цього можна досягти наступними шляхами:

- 1) при проектуванні корабля призначити його елементи таким чином, щоб забезпечувалися плавна й незначна його хитавиця;
- 2) застосувати раціональні заспокоювачі хитавиці;
- 3) переміщенням вантажів на кораблі досягти поліпшення параметрів хитавиці;
- 4) одержати плавність хитавиці відповідною зміною курсу й швидкості ходу корабля відносно фронту хвиль і напрямку вітру.

Дисципліна «Динаміка корабля» є складною для засвоєння студентами комплексною дисципліною, тому корабель розглядається як тверде тіло, яке здійснює гармонійні коливання та має 6 ступенів свободи; через це існує тісний зв'язок з теоретичною механікою і теорією коливань. У той же час хитавиця корабля відбувається в рідині, що має певні фізичні властивості, корабель взаємодіє з нею, тому дисципліна ґрунтується на законах прикладної гідроаеромеханіки та теорії хвиль. Як розділ теорії корабля «Хитавиця корабля» використовує багато понять, які вже були розглянуті у дисципліні «Статика корабля».

На початку вивчення дисципліни розглянуто зовнішні фактори, які викликають хитавицю корабля. Головний фактор – хвилювання, але розгойдування може бути викликане й поривами вітру, ударами або навалом суден, ривками буксирних тросів.

1.1 Предмет і завдання дисципліни

Математичний апарат динаміки корабля базується на фундаментальних поняттях вищої математики, теоретичної механіки та гідроаеромеханіки. При вивченні складних питань динаміки корабля ефективно використовуються результати модельних і натурних експериментів у гідродинамічних лабораторіях та на спеціалізованих морських полігонах.

Мета вивчення дисципліни – формування технічного світогляду майбутнього інженера-кораблебудівника, погляду на судно як на споруду, що експлуатується в складних умовах морського плавання.

Завданнями дисципліни є:

- засвоєння методів прогнозування та вдосконалення морехідних якостей, забезпечення безпеки мореплавання, підвищення економічної ефективності експлуатації суден різних типів, виконання вимог до охорони праці та збереження навколишнього середовища;

- створення фундаменту для вивчення спеціальних дисциплін, серед яких «Міцність та будівельна механіка корабля», «Проектування суднових пристроїв та систем», «Спуск судна на воду», «Розробка технічних засобів освоєння океану», створення нормативних документів, що регламентують побудову та експлуатацію судна.

Після вивчення дисципліни «Динаміка корабля» студент повинен уміти:

- виконувати розрахунки параметрів, що визначають поведінку судна в реальних умовах плавання з використан-

ням сучасних комп'ютерних технологій та засобів експериментальної гідродинаміки;

- аналізувати одержані результати;
- формулювати рекомендації по удосконаленню морехідних якостей корабля як на етапі його проєктування, так і в умовах експлуатації.

1.2 Історія розвитку науки про хитавицю суден

Вперше з наукової точки почав вивчати питання хитавиці корабля академік Петербурзької Академії наук Леона́рд Ейлер (1707–1783). У 1737 році він розглянув питання теорії хитавиці корабля на тихій воді та виклав їх у своїй праці «Корабельна наука», яку було опубліковано у 1749 році. Розглянувши задачі про малі коливання судна на тихій воді, Ейлер звів їх розв'язок до дії простого математичного маятника, який мав той самий період та амплітуду коливань, як і корабель, що здійснює хитавицю. При цьому Ейлер не брав до уваги опір забортної води, а з усіх сил, які діють на корабель як плаваюче тіло, він врахував виключно гідростатичні сили та сили інерції самого корабля.

Приблизно таким самим чином хитавицю корабля досліджував у 1746 році французький астроном П'єр Бугєр (1698–1758).

Дослідженням хитавиці корабля на хвилюванні вперше приділив увагу Даніїл Бернуллі (1700–1782) під час роботи у Петербурзькій Академії наук. Він розглянув вимушені коливання, які описують поведінку корабля на регулярному хвилюванні, та дослідив випадок різкого зростання бортової хитавиці при рівності періодів власних коливань корабля і забортних хвиль, тобто резонансу.

На початку XIX століття член Паризької Академії наук Симеон Дені Пуассон (1781–1840) розробив наближений метод розрахунку хитавиці на тихій воді при більш складних залежностях опору води від швидкості.

У 1861 році англійський учений-кораблебудівник Вільям Фруд (1810–1879) опублікував нову теорію бортової хитавиці корабля на хвилюванні, а у 1863 році з'явилася робота англійського вченого Вільяма Джона Ранкіна (1820–1872), у якій він описав теорію трохохідальних хвиль, чим теоретично довів припущення Фруда. Раніше у 1804 році теорія трохохідальних хвиль була запропонована австрійським ученим та будівельником Фрэнцом Антоном фон Герстнером (1775–1840).

У наступні роки з'явилася ціла серія серйозних робіт, які присвячено дослідженню бортової хитавиці, в тому числі роботи французького кораблебудівника Еміля Бертена (1840–1924), який запропонував наближені методики для врахування впливу скінчених розмірювань корабля на бортову хитавицю та емпіричну формулу для врахування моменту сил опору бортової хитавиці. Проте розрахунків кільової хитавиці судна ще не існувало.

У 1893 році в Морській академії почав читати лекції з хитавиці корабля академік Олексій Миколайович Крилов (1863–1945). Свій перший курс лекцій він склав із праць Ейлера, Бернуллі, Фруда, Ранкіна, Бертена та інших учених.

У 1896 році адмірал Степан Осипович Макаров (1849–1904) запропонував використати спеціально виготовлені цистерни для зменшення амплітуд бортової хитавиці.

Питаннями заспокоювачів хитавиці займався також Іван Григорович Бубнов (1872–1919). Він дослідив на моделях вплив дії так званих площинних цистерн та запропонував метод динамічного розрахунку загальної міцності при поздовжній хитавиці на хвилюванні.

Професор Імператорського політехнічного інституту Олександр Петрович Фан-дер-Фліт (1870–1941) розробив наближені залежності для розрахунку згинаючого моменту при поздовжній хитавиці.

Питаннями хитавиці корабля займався також засновник теоретичної аеродинаміки Микóла Єгóрович Жукóвський (1847–1921). Він уперше звернув увагу на необхідність урахування приєднаних мас води при розрахунках хитавиці. Також він поклав початок гідродинамічній теорії хитавиці.

Характер поведінки корабля при різних умовах хвилювання був досліджений ученими Геóргієм Євста́фійовичем Павле́нком (1898–1970), Васи́лем Григóровичем Вла́совим (1896–1959) та Олекса́ндром Васи́льовичем Ге́расимовим (1861–1944).

Учений-гідромеханік Микóла Євгра́фович Ко́чин (1901–1944) опублікував наукову працю «Теорія хвиль, вимушених коливаннями тіла на вільній поверхні важкої нестискаємої рідини». Її висновки дозволили розкрити питання хитавиці на нерегулярних хвилях. Пізніше на їх основі Макс Да́нілович Ха́скінд (1913–1963) напише ряд наукових статей з гідродинамічної теорії хитавиці. Подальша наукова робота в цій галузі була направлена на встановлення залежностей компонентів гідродинамічних сил, при яких їх можна використати для практичних розрахунків у кораблебудуванні. Тут можна відзначити праці Абра́ма Мойсе́йовича Ба́сіна (1909–1978), який отримав ряд нових залежностей на основі наведених вище робіт М.Є. Жуковського.

Питання нелінійної теорії хитавиці корабля мають особливо велике значення у використанні до розрахунку бортових коливань для вирішення питань остійності на великих кутах крену. Ці питання було вирішено завдяки дослідженням Геóргія Андрі́йовича Фі́рсова (1913–1981). У цьому напрямку досягнуто значних успіхів щодо технічних експериментів, а також методів їх оброблення.

Методи хитавиці малих суден (лоцманських, буксирних, промислових, службових) при підході до судна-партнера були досліджені ректором Одеського національного морського університету доктором технічних наук, профе-

сором Юрієм Леонідовичем Воробйовим (1937–2010) та ефективно використані його аспірантами І.О. Бойцуном, Нго Каном, О.М. Криловим, О.І. Лабіним, С.М. Баскаковим і Т.В. Смірноюю.

Більше половини століття і по наш час у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова існує наукова школа «Морехідність суден». Її засновник – Юлій Вульфівич Рёмез, доктор технічних наук, професор. Послідовником керівника наукової школи є Валерій Олександрович Некрасов – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заслужений діяч науки і техніки України. Наукова школа підготувала 5 докторів та 9 кандидатів технічних наук. У даний час роботу наукової школи також продовжують доктори технічних наук, професори Леонід Михайлович Діхта та Сергій Борисович Прихóдько. Засновник кафедри гідромеханіки доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України Мико́ла Бори́сович Слі́жєвський (1931–2014) опублікував більше 60 наукових праць, які стосуються вдосконалення морехідних якостей підводних керованих апаратів та підводних роботів. Прикладні залежності хитавиці декількох взаємопришвартованих суден запропонував кандидат технічних наук, професор Ю́рій Миха́йлович Корóль. Кандидат технічних наук, доцент Ю́рій Микола́йович Па́щенко розробив графічні залежності та довідкові таблиці для визначення коефіцієнтів приєднаних мас забортної води й демпфування, які лягли в основу сучасних програмних продуктів для розрахунків динаміки кораблів, промислових та малих суден.

Незважаючи на досить великі успіхи, питання теорії хитавиці ще не вичерпані. Багато факторів гідромеханічної теорії хитавиці ще не достатньо досліджені та мають наукову новизну [9, 19, 22, 24].

Питання для самоконтролю

1. Які морехідні якості суден Вам відомі?
2. Дайте визначення терміна «хитавиця корабля».
3. Які негативні фактори породжує хитавиця при експлуатації суден?
4. Згадайте з курсу фізики визначення: «період», «частота», «довжина хвилі», «фронт хвилі».
5. Сформулюйте основний закон гідростатики.
6. Назвіть відомих Вам учених, які працювали над питаннями морехідності корабля.

2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ХВИЛЬ

Хвильовим рухом рідини є процес поширення в ній коливального руху. Причини виникнення хвиль можуть бути різноманітними. Це може бути дія вітру, підземних землетрусів, притягання Місяця, атмосферного тиску і т. п. Існують наступні основні види морських хвиль [2]:

1) *вітрові* хвилі, що виникають у результаті передачі вітром частини своєї енергії вільній поверхні води; оскільки вітер часто змінює свою швидкість і напрямок руху, вітрові хвилі звичайно мають тривимірний нерегулярний характер, тобто мають форму пагорбів різної висоти, ширини й довжини;

2) якщо вітрові хвилі вийшли із зони дії вітру або залишилися після його дії, вони вирівнюються, стають регулярними (мають однаковий період, довжину й висоту) – виникають *брижі* (іноді їх називають «*мертві брижі*»). Це хвилювання буде вже двовимірним, тому що третій вимір – ширина – прагне до нескінченності;

3) вітрові хвилі, а також хвилі брижів, які вийшли до берегової лінії, спотворюються, вершина їх піднімається, а западина стає менше – виникають *прибійні* хвилі. При певному співвідношенні глибини води й довжини хвилі *прибійні* хвилі руйнуються. У цей момент на об'єкти, що перебувають у зоні руйнування хвилі, діє додаткова імпульсивна (ударна) частина навантаження;

4) *корабельні* хвилі, які виникають під час руху суден та інших тіл і споруд поблизу вільної поверхні води;

5) хвилі «*цунамі*», що виникають у результаті дії підводних землетрусів і вивержень вулканів;

6) морські *припливи* й *відливи*, які викликані гравітаційним притяганням Місяця та Сонця;

7) *сейші* – повільні зміни рівня води в акваторії; вони виникають через нерівномірний розподіл атмосферного тиску в морському басейні;

8) *нагонні* хвилі, що виникають через нагін вітром води до вузькостей та заток. Саме сейші та нагонні хвилі є причиною повеней у Південних регіонах України;

9) *капілярні* хвилі – виникають у результаті нерівномірності дії сил поверхневого натягу;

10) *внутрішні* хвилі – хвилі, що виникають на межі розділу двох шарів води, які мають різну щільність через різну температуру або солоність. Цей вид хвиль може викликати інтенсивну хитавицю підводних апаратів.

Для розрахунків хитавиці важливо знати характеристики, в основному першого, другого, третього, четвертого й десятого видів хвиль, а інші хвилі треба враховувати в повсякденній експлуатації з погляду безпеки. Найбільш вивчені в цей час регулярні хвилі (брижі), вітрові та корабельні хвилі.

2.1 Характеристики регулярного хвилювання

Найбільш вивчена хитавиця корабля на регулярному хвилюванні. Це склалося історично. До того ж розрахунки хитавиці на регулярному хвилюванні є основою для розрахунків хитавиці на нерегулярному й прибійному хвилюванні.

У розрахунках хитавиці, як правило, використовується опис лінійних хвиль. При цьому вважається, що ампліту-

ди хвиль малі у порівнянні з їхніми довжинами, швидкості й прискорення частинок води у хвилях малі.

Систему координат $0^\circ \xi^\circ \eta^\circ \zeta^\circ$ для опису хвиль зображено на рис. 2.1. Вісь $0^\circ \xi^\circ$ спрямована паралельно швидкості фронту хвиль $\vec{c}$, вісь $0^\circ \eta^\circ$ – паралельно фронту хвиль, вісь $0^\circ \zeta^\circ$ – вертикально вниз. Площина $0^\circ \xi^\circ \eta^\circ$ – незбурена поверхня води.

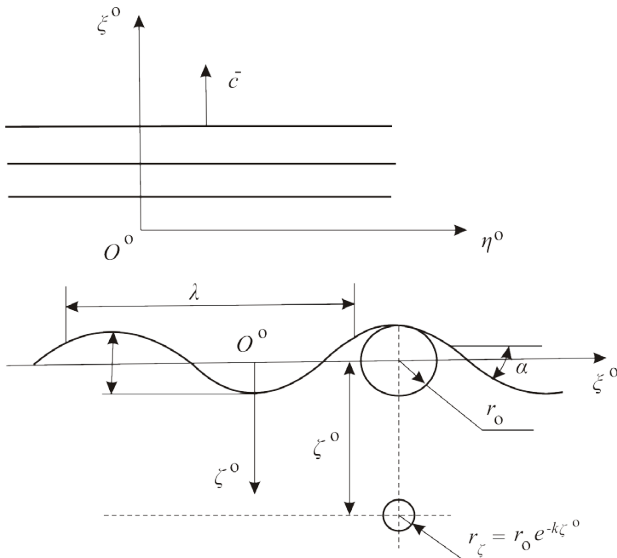


Рисунок 2.1 – Система координат для описання характеристик хвилювання

Для розрахунку необхідні наступні характеристики.

1) Рівняння хвильової поверхні

$$\zeta^\circ = r_0 \cos(k\xi^\circ - \omega t), \quad (2.1)$$

де r_0 – амплітуда хвилі, у той же час це напіввисота хвилі, тобто

$$r_0 = \frac{h_e}{2}, \quad (2.2)$$

а також *радіус орбітального руху* частинок води, що перебувають на поверхні;

h_b – висота хвилі – максимальна відстань по вертикалі між крайніми точками на вершині й підосві хвилі;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad - \quad (2.3)$$

хвильове число або *частота форми*, що характеризує кількість хвиль на одиницю довжини;

λ – довжина хвилі – відстань по горизонталі між двома сусідніми точками, що перебувають в одній фазі;

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \quad - \quad (2.4)$$

частота хвилі, що характеризує кількість хвиль, які проходять через задану вертикаль за одиницю часу;

τ – *період хвилі*, тобто час одного повного коливання рівня води відносно заданої вертикалі.

2) Між хвильовим числом і частотою хвилі існує зв'язок, відомий із теорії лінійних хвиль:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad . \quad (2.5)$$

Із цієї формули можна визначити залежність між довжиною хвилі та періодом. Підставивши (2.3) і (2.4) у (2.5), отримаємо

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \tau^2 \approx 1,56 \tau^2 \quad . \quad (2.6)$$

Тоді

$$\tau = \sqrt{\lambda \frac{g}{2\pi}} \approx 0,8 \sqrt{\lambda} \quad . \quad (2.7)$$

3) Між висотою хвилі й довжиною існує статистичний зв'язок, який описується формулою *Циммермана*:

$$h_{\text{в}} = 0,17 \lambda^{\frac{3}{4}}. \quad (2.8)$$

4) Крутість хвилі

$$K = \frac{h_{\text{хв}}}{\lambda} \quad (2.9)$$

виражається у вигляді дробу, в чисельнику якого – 1, а в знаменнику – число, що показує, у скільки разів довжина хвилі більше висоти ($\frac{1}{20,2}$; $\frac{1}{20}$; $\frac{1}{19,3}$ і т. д.). Як правило, в стандартних розрахунках хитавиці корабля на морському хвилюванні приймається $K = \frac{1}{20}$, але на озерах, водоймищах і внутрішніх морях хвилі більш круті, а значення K можуть досягати $\frac{1}{10}$.

5) Кут хвильового схилу (інша характеристика крутості) – кут між дотичною до хвильової поверхні й віссю $0^\circ \xi^\circ$.

Як відомо з курсу математики, тангенс кута нахилу дотичній є геометричним смислом похідної, тобто

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial \zeta_{\text{хв}}^0}{\partial \xi^0} = -kr_0 \sin(k\xi^0 - \omega t). \quad (2.10)$$

Величина

$$\alpha_0 = kr_0 \quad (2.11)$$

амплітуда кута хвильового схилу, або максимальний кут хвильового схилу.

Підставивши (2.3) у (2.11), отримаємо

$$\alpha_0 = \frac{2\pi}{\lambda} r_0 = \pi \frac{2r_0}{\lambda} = \pi \frac{h_{\%0}}{\lambda}, \quad (2.12)$$

тобто $\alpha_0 = \pi K$ є аналогом крутості, вимірюваної у радіанах.

Можна одержати α_0 у градусах, помноживши α_0 у радіанах на 57,30:

$$\alpha_0 = 1800 \frac{h_e}{\lambda}. \quad (2.13)$$

6) *Швидкість хвилі* (швидкість переміщення фронту хвиль) визначається із формули

$$c = \frac{\lambda}{\tau}, \quad (2.14)$$

оскільки дійсно одна довжина хвилі проходить за один період. З урахуванням (2.7)

$$c \approx 1,25 \sqrt{\lambda}. \quad (2.14')$$

7) *Радіус орбітального руху частинок води*, що перебувають на глибині ζ^0 , складатиме

$$r_\zeta = r_0 e^{-k\zeta^0}. \quad (2.15)$$

8) *Тиск у хвилі* можна визначити за формулою, відомою з теорії лінійних хвиль:

$$p = p_0 + \rho g \zeta^0 - \rho g r_\zeta \cos(k\xi^0 - \omega t), \quad (2.16)$$

де p_0 – атмосферний тиск; $\rho g \zeta^0$ – гідростатичний тиск на глибині ζ^0 ;

$$\Delta p_{\text{хв}} = -\rho g r_\zeta \cos(k\xi - \omega t) - \quad (2.17)$$

хвильова добавка до тиску у хвилі. Саме $\Delta p_{\text{хв}}$ викликає хита-вицю корабля. Якщо хвильовий рух відсутній, $\Delta p_{\text{хв}} = 0$. На поверхні хвилі

$$\Delta p_{\text{хв}} = -\rho g r_0 \cos(k\xi^0 - \omega t). \quad (2.18)$$

9) *Енергія* плоскої хвилі

$$E = \frac{\rho g r_0^2}{2}. \quad (2.19)$$

Ця енергія погонна, тобто така, що приходить на 1 м ширини хвилі. Як було відзначено вище, за напрямом осі $00\eta^0$ хвиля поширюється в нескінченність.

2.2 Характеристики нерегулярного хвилювання

Зразок запису (реалізації) нерегулярного хвилювання зображений на рис. 2.2. Як видно з рисунка, кожна наступна хвиля відрізняється від попередньої по висоті та періоду, тобто по довжині. Якщо позначити висоту якої-небудь хвилі h_i , амплітуда хвилі по визначенню буде дорівнювати $r_i = \frac{h_i}{2}$.

Існують три методи опису нерегулярного хвилювання: статистичний, спектральний і кореляційний. У практичних розрахунках застосовуються в основному статистичний та спектральний методи. Саме вони в посібнику розглянуті більш докладно.

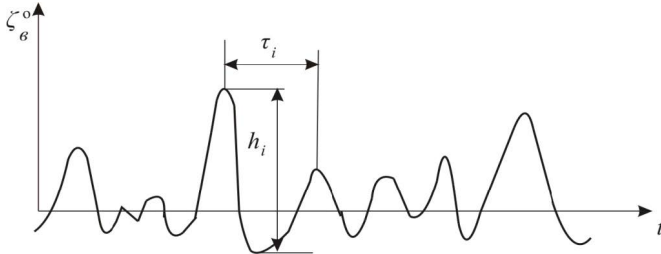


Рисунок 2.2 – Реалізація нерегулярного хвилювання

Статистичний метод

За допомогою цього методу проводиться оцінка ймовірності виникнення хвиль різної висоти. Визначити ймовірність можна приблизно, проаналізувавши досить довгу реалізацію хвилювання й знявши з неї висоти хвиль. Тоді ймовірність виникнення хвилі з амплітудою r_i буде складати

$$p_i = \frac{k}{n}, \quad (2.20)$$

де k – число хвиль із амплітудою r_i на реалізації; n – загальне число хвиль на реалізації. Чим довше запис, тим більш точно визначається ймовірність.

Оцінка інтенсивності хвилювання проводиться за допомогою *дисперсії* (квадрата середнього квадратичного відхилення):

$$D_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2. \quad (2.21)$$

Середня висота хвилі (в імовірнісному змісті) пов'язана з дисперсією співвідношенням

$$\bar{h} = 2,5 \sqrt{D_r}. \quad (2.22)$$

На практиці звичайно застосовується не ймовірність виникнення хвилі якоїсь висоти, а *забезпеченість*. Забезпеченість – це ймовірність виникнення хвиль із висотою, більшою або рівною заданій.

Таким чином, трипроцентна забезпеченість позначає, що зі 100 хвиль тільки три будуть мати висоту більшу або рівну заданій висоті. Забезпеченість записується у вигляді індексу, наприклад: $h_{3\%}$, $h_{0,5\%}$. Середня висота хвилі має забезпеченість 46,5 %, тобто

$$\begin{aligned} h_{46,5\%} &= \bar{h} = 2,5 \sqrt{D_r}; \\ r_{46,5\%} &= \bar{r} = 1,25 \sqrt{D_r}. \end{aligned} \quad (2.22')$$

У *таблицях бальності хвиль* звичайно виписуються значення $h_{3\%}$, для яких

$$h_{3\%} = 5,3 \sqrt{D_r}; \quad r_{3\%} = 2,65 \sqrt{D_r}. \quad (2.23)$$

Тоді необхідно визначити дисперсію хвилі, знаючи висоту $h_{3\%}$. З (2.23) отримаємо

$$D_r = 0,143 \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^2. \quad (2.24)$$

Висота хвилі 0,5%-ої забезпеченості називається максимальною:

$$\begin{aligned} h_{\max} &= h_{0,5\%} = 6,5 \sqrt{D_r}; \\ r_{\max} &= r_{0,5\%} = 3,25 \sqrt{D_r}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Узагальнена оцінка інтенсивності вітрового хвилювання проводиться в умовних одиницях – балах. У країнах Європи застосовується 9-бальна шкала (табл. 2.1). Формула Циммермана відображає зв'язок між середніми значеннями $h_{3\%}$ та $\lambda_{3\%}$ із цієї таблиці.

Таблиця 2.1 – Бали вітрового хвилювання [21]

Бали хвиль	Бали вітру	Довжина хвиль $\lambda_{3\%}$, м	Висота хвиль $h_{3\%}$, м	Період хвиль $\tau_{3\%}$, с	Словесна характеристика
0	0...1	0	0	0	відсутнє
I	2...3	<5	<0,25	<2	слабке
II	3...4	5...15	0,25...0,75	2...3	помірне
III	4	15...25	0,75...1,25	3...4	значне
IV	5	25...40	1,25...2,0	4...5	значне
V	5...6	40...75	2,0...3,5	5...7	сильне
VI	6...7	75...125	3,5...6,0	7...9	сильне
VII	7...8	125...170	6,0...8,5	9...11	дуже сильне
VIII	8...9	170...220	8,5...11,0	11...12	дуже сильне
IX	10...12	>220	>11,0	>12	виключне

Спектральний метод

Статистичний метод не дає всіх необхідних даних для опису хвилювання як безперервного випадкового процесу. Більш зручний для цих цілей спектральний метод, який заснований на представленні реального хвилювання у вигляді суми нескінченного числа одиничних хвиль із випадковими амплітудами, частотами й фазами, тобто

$$\zeta_B^0 = \sum_{i=1}^{n \rightarrow \infty} r_i \cos(ki\zeta_i - \omega_{it} + \delta_i). \quad (2.26)$$

Енергія кожної окремо взятої хвилі складатиме

$$E_i = \frac{\rho g r_i^2}{2}. \quad (2.27)$$

У той же час її можна представити у вигляді:

$$E_i = s(\omega_i) \Delta\omega_i, \quad (2.28)$$

де $s(\omega_i)$ – *питома енергія*, що приходить на інтервал $\Delta\omega_i$, при частоті ω_i .

Дорівнюючи (2.27) і (2.28), отримаємо

$$\frac{\rho g r_i^2}{2} = s(\omega_i) \Delta\omega_i. \quad (2.29)$$

Звідси

$$\frac{2s(\omega_i)}{\rho g} = \frac{r_i^2}{\Delta\omega_i} = S_r(\omega_i). \quad (2.30)$$

Залежність $S_r(\omega)$ (рис. 2.3) називається графіком спектральної щільності, або *енергетичним спектром*. Вона характеризує розподіл енергії хвиль по амплітудах і частотах.

Зв'язок між спектральними й статистичними характеристиками можна знайти з виразу (2.21), підставивши в нього (2.29):

$$D_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{r_i^2}{\Delta \omega_i} \frac{\Delta \omega_i}{n} = \sum_{i=1}^n S_r(\omega_i) \frac{\Delta \omega_i}{n}. \quad (2.31)$$

При $n \rightarrow \infty$ $\frac{\Delta \omega_i}{n} \rightarrow d\omega$, а сума стає інтегралом. Тоді

$$D_r = \int_0^{\infty} S_r(\omega) d\omega. \quad (2.32)$$

За допомогою дисперсії вже легко встановити зв'язок з висотою хвилі заданої забезпеченості та відповідними балами хвилювання.

Спектри найчастіше представляються у формі

$$S_r(\omega) = A \omega^{-ke-g} \omega^{-n}, \quad (2.33)$$

де A, B, k, n – параметри, що залежать від умов хвилеутворення, від ступеня розвиненості хвилювання, від бальності, від акваторії і т. п.

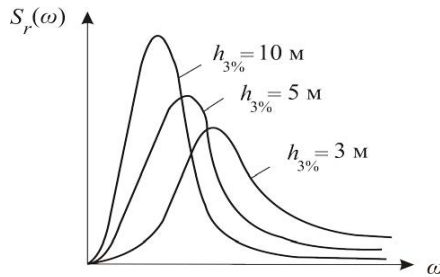


Рисунок 2.3 – Спектри нерегулярного хвилеутворення різної бальності

Як правило, спектри нормують (представляють безрозмірними), розділивши $S_r(\omega)$ на D_r і помноживши на ω_{cp} , тобто розглядають

$$\overline{S_r}(\overline{\omega}) = \frac{S_r(\omega)}{D_r} \omega_{cp}, \quad (2.34)$$

де $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_{\text{cp}}}$ – безрозмірна частота;

$$\omega_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} S_r(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^{\infty} S_r(\omega) d\omega}}. \quad (2.35)$$

Приблизно ω_{cp} можна визначити графічно (рис. 2.4), при цьому

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{\omega_2 + \omega_1}{2},$$

де ω_2 і ω_1 визначаються як межі прямокутника, у якого площа дорівнює площі кривої спектральної щільності, а момент інерції площі відносно осі ординат дорівнює моменту інерції площі під кривою.

Дисперсія при нормуванні визначається за залежністю (2.24).

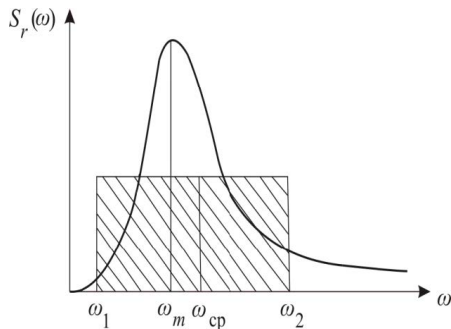


Рисунок 2.4 – Визначення середньої частоти спектра

Існує статистичний зв'язок між ω_{cp} і $h_{3\%}$. Для найбільш розповсюджених спектрів

$$\omega_{\text{cp}} = 1,74(h_{3\%})^{-0,4}. \quad (2.36)$$

Остаточно в нормованому вигляді спектральна щільність записується як

$$\overline{S_r}(\overline{\omega}) = \frac{S_r(\omega)\omega_{cp}}{D_r} = \overline{A} \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^k e^{-\overline{B} \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^2}, \quad (2.37)$$

де $\overline{\omega_m} = \frac{\omega_m}{\omega_{cp}}$;

ω_m – частота, відповідна до максимуму спектра (рис. 2.4);

$$\overline{A} = \frac{A\omega_{cp}}{\omega_m^k D_r}; \quad \overline{B} = \frac{B}{\omega_m^n}. \quad (2.38)$$

Величина ω_m пов'язана з ω_{cp} співвідношеннями, що залежать від виду конкретного спектра.

Нижче наведено деякі основні спектри:

– *спектр Неймана*:

$$\overline{A} = 33,2; \quad k = 6; \quad \overline{B} = 3; \quad n = 2; \quad \omega_m = 0,707\omega_{cp};$$

$$\overline{S_r}(\overline{\omega}) = 33,2 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^6 e^{-3 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^2}; \quad (2.39)$$

– *спектр Бретшнайдера*:

$$\overline{A} = 7,14; \quad k = 5; \quad \overline{B} = 1,25; \quad n = 4; \quad \omega_m = 0,712\omega_{cp};$$

$$\overline{S_r}(\overline{\omega}) = 7,14 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^5 e^{-1,25 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^4}; \quad (2.40)$$

– *спектр Вознесеньського–Нецвєтаєва* (РД5.1003-80):

$$\overline{A} = 9,43; \quad k = 6; \quad \overline{B} = 1,5; \quad n = 4; \quad \omega_m = 0,777\omega_{cp};$$

$$\overline{S_r}(\overline{\omega}) = 9,43 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^6 e^{-1,5 \left(\frac{\overline{\omega_m}}{\overline{\omega}} \right)^4}. \quad (2.41)$$

Зручність нормованих спектрів у тому, що вони не залежать від бальності хвилювання.

Питання для самоконтролю

1. Назвіть відомі Вам характеристики морського хвилювання.
2. Дайте визначення терміна «спектральна щільність».
3. Які спектри хвиль Вам відомі?
4. Назвіть методи дослідження нерегулярних хвиль. У чому вони полягають?
5. Які залежності висоти хвилі від її довжини Вам відомі?
6. Розрахуйте період хвилі, якщо її довжина 100 м.
7. Розрахуйте енергію плоскої морської хвилі, якщо її довжина 120 м.

3 ЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ

3.1 Системи координат. Види хитавиці

Для опису коливань корабля під час хитавиці застосовуються, як правило, три основні системи координат.

1. Абсолютно нерухома в просторі система координат $00\xi^0\eta^0\zeta^0$ (рис. 3.1), яку, до речі, також застосовують для опису регулярного хвилювання. Вісь $00\xi^0$ паралельна швидкості напрямку хвиль $\bar{c}$, вісь $00\eta^0$ паралельна фронту хвиль, вісь $00\zeta^0$ спрямована вертикально вниз, площина $00\xi^0\eta^0$ – незбурена поверхня води.

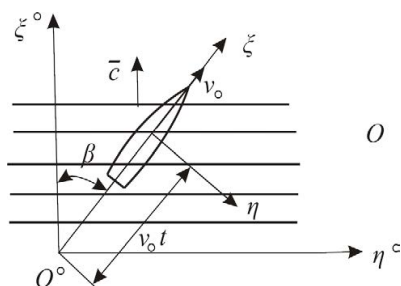


Рисунок 3.1 – Перша та друга системи координат

2. *Перша рухома система координат $0\xi\eta\zeta$.* Площина $0\xi\eta$ збігається з незбуреною поверхнею води. Вісь 0ζ спрямована вертикально вниз. Початок координат 0 рухається разом з кораблем поступально з постійною швидкістю $\bar{u}_0$. Кут β між швидкостями $\bar{c}$ та $\bar{u}_0$ називається *курсовим*.

Якщо хитавиці немає, то початок координат O перебуває на одній вертикалі із центром тяжіння (ЦТ) корабля й розташований у площині ватерлінії (ВЛ). Вісь $O\xi$ лежить у діаметральній площині (ДП) і спрямована в ніс паралельно $\bar{u}_0$, вісь $O\eta$ спрямована на правий борт, $O\xi\eta$ – площина ВЛ.

Через те, що система координат $O\xi\eta\zeta$ бере участь тільки у поступальному русі корабля й не бере участь у хитавиці, її називають також напіврухомою.

3. Друга рухома система координат $Gxyz$ жорстко зв'язана з кораблем і при хитавиці рухається разом з ним. Початок координат – центр тяжіння корабля G – лежить у ДП. Вісь Gx спрямована в ніс, вісь Gy – на правий борт, вісь Gz – вниз (рис. 3.2). Система координат $O\xi\eta\zeta$ служить для опису коливального руху корабля, а система координат $Gxyz$ – для опису самого корабля.

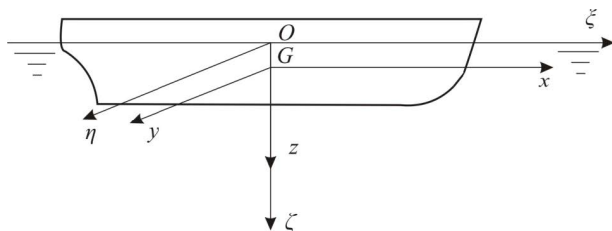


Рисунок 3.2 – Друга та третя системи координат

Відповідно до прийнятих систем координат існує 6 видів хитавиці (рис. 3.3):

1) *поздовжньо-горизонтальна хитавиця* – поступальний коливальний рух корабля разом із ЦТ по напрямку осі $O\xi$. Характеризується переміщенням ЦТ ξ_g , швидкістю переміщення $\dot{\xi}_g$ і прискоренням $\ddot{\xi}_g$. Позитивний напрямок руху в ніс;

2) *поперечно-горизонтальна хитавиця* – поступальний коливальний рух корабля разом із ЦТ по напрямку осі $O\eta$.

Характеризується відповідно переміщенням ЦТ, швидкістю й прискоренням $\eta_g, \dot{\eta}_g, \ddot{\eta}_g$. Позитивний напрямок руху на правий борт;

3) *вертикальна хитавиця* – поступальний коливальний рух по напрямку осі 0ζ . Характеризується відповідно переміщенням ЦТ, швидкістю переміщення та прискоренням $\zeta_g, \dot{\zeta}_g, \ddot{\zeta}_g$. Позитивний напрямок руху вниз;

4) *бортова хитавиця* – обертальний коливальний рух відносно осі Gx . Характеризується кутом крену θ , кутовою швидкістю $\dot{\theta}$ та кутовим прискоренням $\ddot{\theta}$. Позитивне нахиллення при крені на правий борт;

5) *кільова хитавиця* – обертальний коливальний рух щодо осі Gy з кутом диференту ψ , кутовою швидкістю $\dot{\psi}$ та кутовим прискоренням $\ddot{\psi}$. Позитивний диферент – на корму;

6) *рискання* – обертальний коливальний рух відносно осі Gz з кутом нишпорення ϕ , кутовою швидкістю $\dot{\phi}$ та кутовим прискоренням $\ddot{\phi}$; позитивний рух при рисканні – праворуч.

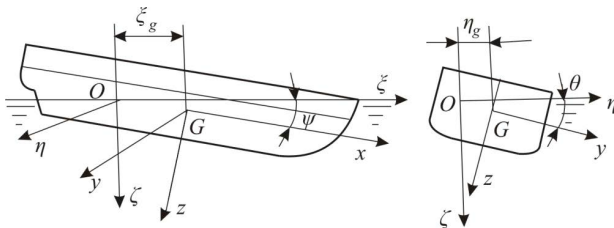


Рисунок 3.3 – Переміщення корабля при хитавиці

Користуючись термінологією, відомою з теоретичної механіки, можна сказати, що перші три види хитавиці – це переносний рух корабля разом із центром ваги G , а наступні три – відносний рух корабля щодо осей, які проходять через ЦТ.

Для кораблів, які знаходяться у вільному (не на якорі, не пришвартованому і взагалі без будь-яких зв'язків з іншими об'єктами) стані реактивні сили існують тільки для вертикальної, бортової та кільової хитавиці, тому ці види хитавиці називають *основними*. Інші види хитавиці називаються *додатковими*.

Поздовжньо-горизонтальна, вертикальна та кільова хитавиця в комплексі називаються *поздовжньою* хитавицею (виникає в площині ДП), а поперечно-горизонтальна, бортова й вертикальна – в комплексі називаються *бортовою* (*поперечною*) хитавицею, тому що виникає в площині, перпендикулярній ДП.

3.2 Класифікація сил, які діють на корабель при хитавиці

На корабель як на тверде тіло, що здійснює рухи із прискоренням, крім сили ваги D , діють також сили й моменти, обумовлені інерцією. Їх можна записати у вигляді:

$$\frac{D}{g} \ddot{\xi}_g; \frac{D}{g} \ddot{\eta}_g; \frac{D}{g} \ddot{\zeta}_g; Jx \ddot{\theta}; Jy \ddot{\psi}; Jz \ddot{\phi}. \quad (3.1)$$

Тут і далі $\frac{D}{g}$ – вага корабля; Jx, Jy, Jz – моменти інерції маси корабля відносно осей Gx, Gy та Gz .

Через те, що корабель здійснює коливання на поверхні води, з боку води діють сили й моменти гідромеханічної природи. Вони розділяються на три складові.

1. *Гідростатичні сили* – результуючі гідростатичних тисків, які діють на змочену поверхню корабля, змінну під час хитавиці.

У рівноважному положенні при відсутності хитавиці на корабель діє сила плавучості, яка дорівнює $P_{\zeta_{\text{гідрост}}} = -\rho g v_0$ (v_0 – об'ємна водотоннажність, знак « $\rightarrow$ » обраний тому, що

сила спрямована вертикально вгору – проти позитивного напрямку осі $O\zeta$).

При хитавиці у воду будуть входити додаткові об'єми δvt або буде змінюватися форма підводного об'єму корабля, внаслідок чого виникнуть відновлювальні сили і моменти. Приклад визначення відновлювальної сили для чисто вертикальної хитавиці симетричного (або майже симетричного) відносно модель-шпангоута корабля показаний на рис. 3.4. У цьому випадку $P_{\zeta \text{ відн}} = -\rho g S_{\theta} \zeta_g$, тому що додатковий занурений об'єм $\delta vt = S_{\theta} \zeta_g$. Знак «-» прийнятий тому, що сила спрямована проти переміщення.

Для чисто бортової хитавиці

$$M_x = -D h_{\theta} \theta. \quad (3.2)$$

Тут h_{θ} – початкова поперечна метацентрична висота.

Формула (3.1) відома зі статки корабля. Знак «-» прийнятий тому, що відновлювальний момент діє проти нахилення.

Для кільової хитавиці справедлива залежність

$$M_y = -D H_{\theta} \psi, \quad (3.2')$$

де H_{θ} – початкова поздовжня метацентрична висота.

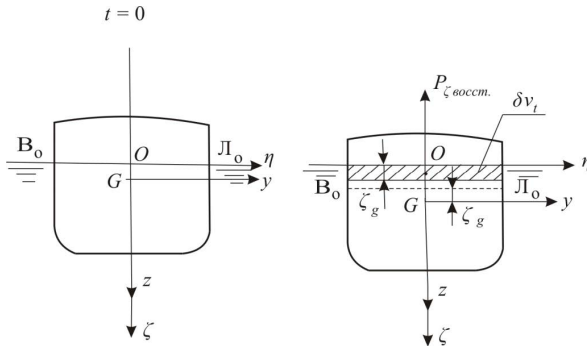


Рисунок 3.4 – Визначення сил при вертикальній хитавиці

Відновлювальні сили аналогічні силі стислої пружини і лінійним чином залежать від переміщень. Це вірно при малих переміщеннях, при великих переміщеннях такі залежності більш складні, а лінійна теорія хитавиці буде давати значні погрішності.

2. Гідродинамічні сили. Це сили, які виникають у результаті передачі кораблем частини своєї енергії забортній воді. Деяка частка її витрачається на додання часткам води швидкостей – виникають сили опору (демпфірування) хитавиці, а інша енергія витрачається на додання часткам води прискорень – виникають сили інерції забортної води.

Сили опору можуть бути *хвильової природи* (енергія йде на створення хвиль, які відходять від *корабля*) і в'язкісної (енергія витрачається на подолання тертя води та на вихоротворення).

При малих нахиленнях

$$P_{\xi \text{опору}} = -v_{11}\dot{\xi}_g - v_{12}\dot{\eta}_g - v_{13}\dot{\zeta}_g - v_{14}\dot{\theta} - v_{15}\dot{\psi} - v_{16}\dot{\phi} ;$$

$$P_{\eta \text{опору}} = -v_{21}\dot{\xi}_g - v_{22}\dot{\eta}_g - v_{23}\dot{\zeta}_g - v_{24}\dot{\theta} - v_{25}\dot{\psi} - v_{26}\dot{\phi}; \dots \quad (3.3)$$

і т. п.

У цих залежностях:

v_{ik} – коефіцієнти опору; i – індекс, що позначає той вид хитавиці, для якого підраховується сила опору; k – той вид хитавиці, який впливає.

З урахуванням симетрії корабля відносно ДП і мідельшпангоута та припущення про досить більші відношення L/B і L/T , можна суттєво спростити вирази (3.3):

$$P_{\xi \text{опору}} = -v_{11}\dot{\xi}_g ; \quad P_{\eta \text{опору}} = -v_{22}\dot{\eta}_g ;$$

$$P_{\zeta \text{опору}} = -v_{33}\dot{\zeta}_g ; \quad M_{\chi \text{опору}} = -v_{44}\dot{\theta} ; \quad (3.4)$$

$$M_{\psi \text{опору}} = -v_{55}\dot{\psi} ; \quad M_{\phi \text{опору}} = -v_{66}\dot{\phi} .$$

Аналогічним чином можна одержати спрощені вирази для інерційних сил:

$$\begin{aligned} P_{\xi_{\text{ін}}} &= -\lambda_{11}\ddot{\xi}_g; & P_{\eta_{\text{ін}}} &= -\lambda_{22}\ddot{\eta}_g; \\ P_{\zeta_{\text{ін}}} &= -\lambda_{33}\ddot{\zeta}_g; & M_{x_{\text{ін}}} &= -\lambda_{44}\ddot{\theta}; \\ M_{y_{\text{ін}}} &= -\lambda_{55}\ddot{\psi}; & M_{z_{\text{ін}}} &= -\lambda_{66}\ddot{\phi}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тут і далі λ_{ik} – *приєднані маси інерції забортної води*.

Для визначення гідродинамічних сил існують різні методи. Більш докладний опис цих методів можна знайти у відповідній літературі [8, 12, 15]. У розділі 6 даного посібника наводяться номограми В.В. Луговського, які використовують при розрахунках бортової хитавиці корабля [12, 16].

3. Збурюючі сили і моменти. На хвилюванні частина енергії хвиль передається кораблю і за рахунок цього діють збурюючі сили і моменти. Вони умовно функціонально залежать від часу. Величина їх залежить від розмірів набігаючих на корабель хвиль, водотоннажності корабля та його положення відносно хвиль.

У загальному вигляді збурюючі сили та моменти позначено як $P_x(t)$, $P_y(t)$, $P_z(t)$, $M_x(t)$, $M_y(t)$, $M_z(t)$. На тихій воді збурюючі сили і моменти дорівнюють нулю.

3.3 Загальна система рівнянь лінійної хитавиці корабля

У цьому параграфі корабель вважається симетричним відносно мідель-шпангоута.

З теоретичної механіки відомі рівняння Лагранжа руху твердого тіла:

$$\frac{D}{g}\ddot{\xi}_g = \sum P_{\xi}; \quad \frac{D}{g}\ddot{\eta}_g = \sum P_{\eta}; \quad \frac{D}{g}\ddot{\zeta}_g = \sum P_{\zeta};$$

$$J_x \ddot{\theta} = \sum M_x; \quad J_y \ddot{\psi} = \sum M_y; \quad J_z \ddot{\phi} = \sum M_z. \quad (3.6)$$

Якщо підставити всі вирази для сил, що діють на корабель, отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{D}{g} \ddot{\xi}_g &= -v_{11} \dot{\xi}_g - \lambda_{11} \ddot{\xi}_g + P_\xi(t); \\ \frac{D}{g} \ddot{\eta}_g &= -v_{22} \dot{\eta}_g - \lambda_{22} \ddot{\eta}_g - P_\eta(t); \\ \frac{D}{g} \ddot{\zeta}_g &= D - \rho g V_0 - \rho g S_0 \zeta_g - v_{33} \dot{\zeta}_g - \lambda_{33} \ddot{\zeta}_g + P_\zeta(t); \\ J_x \ddot{\theta} &= -D h_0 \theta - v_{44} \dot{\theta} - \lambda_{44} \ddot{\theta} + M_x(t); \\ J_y \ddot{\psi} &= -D H_0 \psi - v_{55} \dot{\psi} - \lambda_{55} \ddot{\psi} + M_y(t); \\ J_z \ddot{\phi} &= -v_{66} \dot{\phi} - \lambda_{66} \ddot{\phi} + M_z(t). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Сили D та $\rho g V_0$ взаємно компенсуються.

Перемістивши деякі члени в ліві частини рівнянь, залишивши в правих збурюючі сили і моменти, після приведення подібних членів загальна лінійна система 6 рівнянь хитавиці корабля на хвилюванні буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{11}\right) \ddot{\xi}_g + v_{11} \dot{\xi}_g &= P_\xi(t); \\ \left(\frac{D}{g} + \lambda_{22}\right) \ddot{\eta}_g + v_{22} \dot{\eta}_g &= P_\eta(t); \\ \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right) \ddot{\zeta}_g + v_{33} \dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g &= P_\zeta(t); \\ (J_x + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + v_{44} \dot{\theta} + D h_0 \theta &= M_x(t); \\ (J_y + \lambda_{55}) \ddot{\psi} + v_{55} \dot{\psi} + D H_0 \psi &= M_y(t); \\ (J_z + \lambda_{66}) \ddot{\phi} + v_{66} \dot{\phi} &= M_z(t). \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.4 Хитавиця корабля на тихій воді

3.4.1 Власні частоти та періоди хитавиці корабля. Коефіцієнти затухання

На тихій воді в правих частинах рівнянь (3.8) виходять нулі, через відсутність збурюючих сил та моментів.

При виникненні збурення після припинення його впливу виникне хитавиця корабля. Через відсутність відновлюючих сил додаткові види хитавиці будуть являти собою аперіодичні рухи і не становитимуть з погляду динаміки корабля практичного інтересу.

Рівняння основних видів хитавиці приймуть вигляд

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g &= 0; \\ (J_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta &= 0; \\ (J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + v_{55}\dot{\psi} + DH_0\psi &= 0. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Розділивши всі члени рівнянь на відповідні перші коефіцієнти, отримаємо

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta}_g + \frac{v_{33}}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}}\dot{\zeta}_g + \frac{\rho g S_0}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}}\zeta_g &= 0; \\ \ddot{\theta} + \frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}}\dot{\theta} + \frac{Dh_0}{J_x + \lambda_{44}}\theta &= 0; \\ \ddot{\psi} + \frac{v_{55}}{J_y + \lambda_{55}}\dot{\psi} + \frac{DH_0}{J_y + \lambda_{55}}\psi &= 0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для спрощення практичних розрахунків введено такі позначення:

а) коефіцієнти затухання відповідно вертикальної, бортової та кильової хитавиці –

$$\frac{\frac{v_{33}}{D} + \lambda_{33}}{g} = 2v_{\zeta}; \quad \frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}} = 2v_{\theta}; \quad \frac{v_{55}}{J_y + \lambda_{55}} = 2v_{\psi}; \quad (3.11)$$

б) власні частоти відповідно вертикальної, бортової та кильової хитавиці –

$$\sqrt{\frac{\rho g S_0}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}}} = n_{\zeta}; \quad \sqrt{\frac{D h_0}{J_x + \lambda_{44}}} = n_{\theta}; \quad \sqrt{\frac{D H_0}{J_y + \lambda_{55}}} = n_{\psi}. \quad (3.12)$$

Із цими частотами пов'язані періоди вертикальної, бортової та кильової хитавиці відповідно:

$$\begin{aligned} T_{\zeta} &= \frac{2\pi}{n_{\zeta}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{D}{g} + \lambda_{33}}{\rho g S_0}}; \\ T_{\theta} &= \frac{2\pi}{n_{\theta}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_x + \lambda_{44}}{D h_0}}; \\ T_{\psi} &= \frac{2\pi}{n_{\psi}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_y + \lambda_{55}}{D H_0}}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Таким чином, рівняння хитавиці запишуться в наведений (зручний для розв'язку) формі:

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta}_g + 2v_{\zeta}\ddot{\zeta}_g + n_{\zeta}^2\zeta_g &= 0; \\ \ddot{\theta} + 2v_{\theta}\dot{\theta} + n_{\theta}^2\theta &= 0; \\ \ddot{\psi} + 2v_{\psi}\dot{\psi} + n_{\psi}^2\psi &= 0. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Ці рівняння описують загасаючі коливання. Для найбільш цікавого випадку бортової хитавиці розв'язок буде мати вигляд

$$\theta = A_{\theta} e^{-v_{\theta} t} \cos(\omega_{\theta} t - \beta_{\theta}), \quad (3.15)$$

де A_θ – початкова амплітуда; β_θ – фаза, що характеризує зсув максимальної амплітуди від початку коливаний; $\omega_\theta = \sqrt{n_\theta^2 - v_\theta^2} \approx n_\theta$ – частота хитавиці корабля на тихій воді.

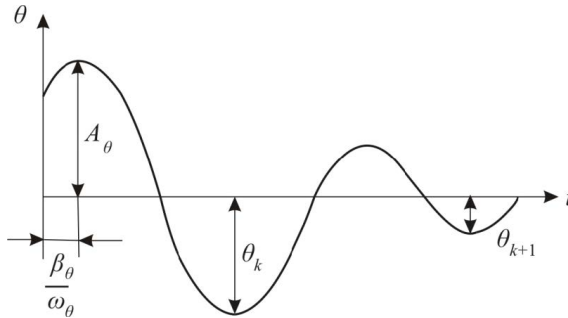


Рисунок 3.5 – Загасаючі бортові коливання на тихій воді

Під час експлуатації корабля при необхідності виконати розрахунки періодів хитавиці в досить короткий час, а іноді – негайно, замість залежностей (3.13) можна використати наближені формули основних періодів хитавиці, с [9–11]:

$$\begin{aligned} T_\zeta &= 2,5\sqrt{T_{\text{ср}}}, \\ T_\theta &= c \frac{B}{\sqrt{h}}, \\ T_\psi &= 2,4\sqrt{T_{\text{ср}}}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Тут $T_{\text{ср}}$ – середня осадка – середнє арифметичне між осадкою на носовому та кормовому перпендикулярі, м; c – інерційний коефіцієнт (розраховується за довідниковими таблицями у залежності від головних розмірювань та коефіцієнтів повноти); B – ширина корабля, м.

3.4.2 Логарифмічний декремент затухання

Ступінь затухання коливань характеризується відношенням сусідніх через період амплітуд – *декрементом затухання*:

$$\frac{\theta_k}{\theta_{k+1}} = \frac{A_\theta e^{-v_\theta t}}{A_\theta e^{-v_\theta(t+T_\theta)}} = e^{v_\theta T_\theta}. \quad (3.16)$$

Декремент затухання показує, у скільки разів кожне наступне коливання менше попереднього.

Натуральний логарифм від цього виразу

$$\ln \frac{\theta_k}{\theta_{k+1}} = v_\theta T_\theta = v_\theta \frac{2\pi}{n_\theta} = \pi \frac{2v_\theta}{n_\theta} \quad (3.17)$$

називається *логарифмічним декрементом затухання*.

Уведемо *безрозмірний коефіцієнт затухання бортової хитавиці*:

$$\overline{2v_\theta} = \frac{2v_\theta}{n_\theta}. \quad (3.18)$$

Аналогічним чином можна ввести *безрозмірні коефіцієнти затухання вертикальної та кільової хитавиці*:

$$\overline{2v_\zeta} = \frac{2v_\zeta}{n_\zeta}; \quad \overline{2v_\psi} = \frac{2v_\psi}{n_\psi}. \quad (3.19)$$

Зручність використання безрозмірних коефіцієнтів затухання полягає в тому, що вони практично не залежать від розмірів плаваючих об'єктів (тобто однакові як для моделі, так і для натурального корабля), які використовують при проведенні модельних експериментів.

Із (3.17) зрозуміло, що

$$\overline{2v_\theta} = \frac{2v_\theta}{n_\theta} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{\theta_k}{\theta_{k+1}}. \quad (3.18')$$

Ця формула застосовується для визначення безрозмірних коефіцієнтів затухання як у модельних експериментах, так і при натурних випробуваннях. Самі коефіцієнти затухання відіграють основну роль при розрахунках характеристик хитавиці на хвилюванні, особливо резонансних амплітуд.

По записах загасаючої хитавиці можна визначити також приєднані маси моделі та корабля. Якщо заміряти по запису загасаючих коливань період, можна визначити іншу безрозмірну величину

$$k_0 = \frac{\lambda_{44}}{J_x} = \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \frac{Dh_0}{J_x} - 1, \quad (3.20)$$

яка також не залежить від масштабу корабля і може визначатися в модельних експериментах. Знаючи її, можна розрахувати λ_{44} для корабля. Формула (3.20) отримана з виразу для періоду власних коливань.

3.5 Лінійна теорія хитавиці корабля, розташованого лагом до хвилювання

3.5.1 Визначення збурюючих сил

Зв'язок між координатами в системах $00\xi^0\eta^0\zeta^0$ і $0\xi\eta\zeta$ записується у вигляді

$$\begin{aligned} \xi^0 &= (\xi + u_0 t) \cos \beta - \eta \sin \beta; \\ \eta^0 &= (\xi + u_0 t) \sin \beta + \eta \cos \beta; \\ \zeta^0 &= \zeta. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Тому вираз для хвильової поверхні в системі координат $0\xi\eta\zeta$ прийме вигляд

$$\zeta_e = r_0 \cos[k(\xi + u_0 t) \cos \beta - k\eta \sin \beta - \omega t], \quad (3.22)$$

а вираз для кута хвильового схилу –

$$\alpha = -\alpha_0 \sin[k(\xi + u_0 t) \cos \beta - k\eta \sin \beta - \omega t], \quad (3.23)$$

або

$$\begin{aligned} \zeta_e &= r_0 \cos[k\xi \cos \beta - k\eta \sin \beta - (\omega - ku_0 \cos \beta)] = \\ &= r_0 \cos(k\xi \cos \beta - k\eta \sin \beta - \omega_\kappa t); \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\alpha = -\alpha_0 \sin(k\xi \cos \beta - k\eta \sin \beta - \omega_\kappa t). \quad (3.25)$$

У цих виразах введено частоту хвилі, яка задається:

$$\omega_k = \omega - k u_0 \cos \beta = \omega \left(1 - \frac{k}{\omega} u_0 \cos \beta\right) = \omega \left(1 - \frac{u_0}{c} \cos \beta\right). \quad (3.26)$$

У частоті враховується вплив швидкості ходу й курсового кута. Саме з такою частотою, що набігає на хвилювання, і буде взаємодіяти корабель.

Аналогічно

$$\Delta p = -\rho g r_0 e^{-k\zeta} \cos(k\xi \cos \beta - k\eta \sin \beta - \omega_k t). \quad (3.27)$$

Напівнерухома система координат $\theta\xi\eta\zeta$ і система координат $Gxyz$ пов'язані між собою через переміщення корабля при хитавиці. У рамках лінійної теорії характеристики хвилювання, зокрема, величина $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, і характеристики хитавиці корабля – малі першого порядку, тому з точністю до малих 2-го порядку можна вважати, що $k\xi \approx kx$; $k\eta \approx ky$; $k\zeta \approx kz$. Тоді (3.24)–(3.26) перепишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} \zeta_s &= r_0 \cos(kx \cos \beta - ky \sin \beta - \omega_k t); \\ \alpha &= -\alpha_0 \sin(kx \cos \beta - ky \sin \beta - \omega_k t); \\ \Delta p &= -\rho g r_0 e^{-kz} \cos(kx \cos \beta - ky \sin \beta - \omega_k t). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Вирази (3.28) дають можливість визначати діючі на корабель збурюючі сили при набіганні хвилювання під довільним курсовим кутом.

Найбільший інтерес у практиці становить випадок розташування корабля лагом до хвилювання. При набіганні хвиль з правого борту справедливо $\beta = \frac{\pi}{2}$; $\omega_k = \omega$ та

$$\begin{aligned} \zeta_s &= r_0 \cos(ky + \omega t); \\ \alpha &= \alpha_0 \sin(ky + \omega t); \\ \Delta p &= -\rho g r_0 e^{-kz} \cos(ky + \omega t). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Для корабля, ширина й осадка якого порівняні з довжиною хвилі, значення $ky = \frac{2\pi}{\lambda}y$ та $kz = \frac{2\pi}{\lambda}z$ у межах ширини B та осадки T будуть мати кінцеве значення, а величини $\zeta_{\%}$, α , Δp у межах ширини та осадки будуть змінними. Хвильова добавка тиску буде залежати від глибини. Такий корабель називається кораблем кінцевих розмірів.

$$\text{Якщо } kB = \frac{2\pi}{\lambda}B = 2\pi\frac{B}{\lambda} \rightarrow 0, \text{ то } kT = \frac{2\pi}{\lambda}T = 2\pi\frac{T}{\lambda} \rightarrow 0,$$

корабель називається кораблем нескінченно малих розмірів (для такого корабля ширина й осадка малі в порівнянні з довжиною хвилі). При цьому вирази (3.29) спростяться і будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned}\zeta_{\%} &= r_0 \cos \omega t; \\ \alpha &= \alpha_0 \sin \omega t; \\ \Delta p &= -\rho g r_0 \cos \omega t,\end{aligned}\tag{3.30}$$

тобто хвильова поверхня в межах ширини залишається площинною, а тиск не зміниться за глибиною (рис. 3.6 і 3.7). Корабель уподібнюється частці води й бере участь у хвильовому русі як частка води. Такий підхід було запропоновано вперше Вільямом Фрудом у XIX столітті.

3.5.2 Рівняння хитавиці корабля нескінченно малих розмірів на хвилюванні

Для корабля нескінченно малих розмірів збурюючі сили легко виводяться з використанням принципу відносного руху.

При вертикальній хитавиці (див. рис. 3.6) корабель переміститься від початкового положення на величину ζ_g зі швидкістю $\dot{\zeta}_g$ та прискоренням $\ddot{\zeta}_g$, але за цей час хвильова поверхня переміститься на відстань ζ_{xb} зі швидкістю $\dot{\zeta}_{xb}$ й прискоренням $\ddot{\zeta}_{xb}$.

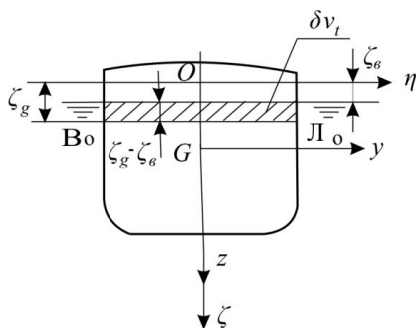


Рисунок 3.6 – Визначення збурюючих сил при вертикальній хитавиці

Відповідно всі гідромеханічні сили будуть залежати від відносних параметрів хитавиці. Тоді рівняння хитавиці на тихій воді можна записати у формі Лагранжа:

$$\frac{D}{g}\ddot{\zeta}_g = -\rho g S_0(\zeta_g - \zeta_{\text{XB}}) - v_{33}(\dot{\zeta}_g - \dot{\zeta}_{\text{XB}}) - \lambda_{33}(\ddot{\zeta}_g - \ddot{\zeta}_{\text{XB}}). \quad (3.31)$$

Частину членів рівняння перенесено у ліву частину рівняння:

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + \mathbf{v}_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g = \rho g S_0 \zeta_{\text{XB}} + \mathbf{v}_{33}\dot{\zeta}_{\text{XB}} + \lambda_{33}\ddot{\zeta}_{\text{XB}}. \quad (3.32)$$

Якщо підставити $\zeta_{\infty} = r_0 \cos \omega t$ з (3.30), а також $\dot{\zeta}_{\text{XB}} = r_0 \omega \sin \omega t$ і $\ddot{\zeta}_{\text{XB}} = -r_0 \omega^2 \cos \omega t$, отримаємо рівняння вертикальної хитавиці корабля нескінченно малих розмірів на хвилюванні:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right) \ddot{\zeta}_g + \mathbf{v}_{33} \dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g = \\ & = \rho g S_0 r_0 \cos \omega t - \mathbf{v}_{33} r_0 \omega \sin \omega t - \lambda_{33} r_0 \omega^2 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3.33)$$

У лівій частині рівняння знаходяться члени, які описують хитавицю на тихій воді, у правій – члени, що залежать від характеристик хвилювання – збурюючі сили. За відсутності хвиль у правій частині буде 0.

Друга й третя складові називаються *дифракційними* силами. Вони враховують викривлення поля тисків у хвилі через присутність корабля. Сила $-v_{33}r_0^3\omega\sin\omega t$ пропорційна коефіцієнту опору (демпфірування) і називається *демпфірувальною частиною* дифракційної складової, а сила $-\lambda_{33}r_0^3\omega^2\cos\omega t$ називається відповідно *інерційною частиною* дифракційної складової.

Для бортової хитавиці корабля рівняння знайдено аналогічно (рис. 3.7). Корабель нахилиється на кут θ з кутовою швидкістю $\dot{\theta}$ і кутовим прискоренням $\ddot{\theta}$. За цей час хвилюва поверхня нахилиється на кут α з кутовою швидкістю $\dot{\alpha}$ і кутовим прискоренням $\ddot{\alpha}$. Відносно переміщення корабля буде відбуватися на кут $\theta - \alpha$ з кутовою швидкістю $\dot{\theta} - \dot{\alpha}$ і кутовим прискоренням $\ddot{\theta} - \ddot{\alpha}$.

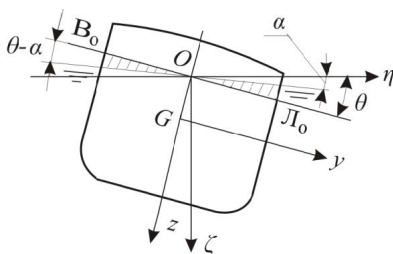


Рисунок 3.7 – Визначення збурюючих моментів при бортовій хитаючи

Рівняння Лагранжа для бортової хитавиці матиме вигляд

$$J_x \ddot{\theta} = -Dh_0(\theta - \alpha) - v_{44}(\dot{\theta} - \dot{\alpha}) - \lambda_{44}(\ddot{\theta} - \ddot{\alpha}). \quad (3.34)$$

Для спрощення розрахунків деякі члени перенесено в праву частину:

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = Dh_0\alpha + v_{44}\dot{\alpha} + \lambda_{44}\ddot{\alpha}. \quad (3.35)$$

Підставивши в (3.35) $\alpha = \alpha_0 \sin \omega t$, $\dot{\alpha} = \alpha_0 \omega \cos \omega t$, $\ddot{\alpha} = -\alpha_0 \omega^2 \sin \omega t$, отримаємо рівняння бортової хитавиці корабля нескінченно малих розмірів:

$$\begin{aligned} (I_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = \\ = Dh_0\alpha_0 \sin \omega t + v_{44}\alpha_0 \omega \cos \omega t - \lambda_{44}\alpha_0 \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.36)$$

У правій частині рівняння (3.36) знаходяться наступні складові збурюючого моменту:

$Dh_0\alpha_0 \sin \omega t$ – криловська (головна) складова;

$v_{44}\alpha_0 \omega \cos \omega t$ – демпфірувальна частина дифракційної складової;

$-\lambda_{44}\alpha_0 \omega^2 \sin \omega t$ – інерційна частина дифракційної складової [19, 20].

Одержати збурюючий момент можна, умовно «закріпивши» корабель так, щоб він мав можливість переміщатися вертикально, але не міг робити кутових переміщень.

3.5.3 Врахування кінцевих розмірів корабля у рівняннях хитавиці. Рівняння хитавиці корабля кінцевих розмірів

Для того, щоб урахувати кінцевість ширини та осадки корабля в порівнянні з довжиною хвилі (діючий профіль хвилі в межах ширини та зміна тиску по глибині в межах осадки), у виразах для збурюючих сил і моментів вводяться спеціальні поправочні (редукційні) коефіцієнти. Зміст їх наочно видно з рис. 3.6 і рис. 3.7. При врахуванні кінцево-

сті ширини в її межах буде видним хвильовий профіль. При цьому, наприклад, головна складова збурюючої сили буде менше, ніж для нескінченно малого корабля через те, що додатковий об'єм, по якому визначається сила плавучості, буде менше (заштрихована частина). Аналогічним чином будуть менше й дифракційні члени.

Ці поправочні коефіцієнти позначено як κ_ζ і κ_θ та підставлено їх у вигляді множників перед r_0 і α_0 відповідно. Величини цих коефіцієнтів перебувають у межах від 0 до 1. Для корабля нескінченно малих розмірів $\kappa_\zeta = 1$ і $\kappa_\theta = 1$.

У теорії хитавиці існує великий розділ, присвячений визначенню цих коефіцієнтів. За пропозицією Ю.В. Ремеза [5] фахівці представляють їх у вигляді $\kappa_\zeta \approx \kappa_{\zeta B} \kappa_{\zeta T}$ та $\kappa_\theta \approx \kappa_{\theta B} \kappa_{\theta T}$, тобто розділяють вплив кінцевості ширини (коефіцієнти $\kappa_{\zeta B}$ та $\kappa_{\theta B}$) та кінцевості осадки (коефіцієнти $\kappa_{\zeta T}$ та $\kappa_{\theta T}$).

Для корабля, у якого обводи корпусу близькі до параболічних, при розрахунках поправочних коефіцієнтів можна використовувати наступні формули:

$$\begin{aligned}\kappa_{\zeta T} &= 1 - \chi kT + \frac{\chi}{2(2 - \chi)} (kT)^2 - \frac{\chi}{6(3 - 2\chi)} (kT)^3 + \dots; \\ \kappa_{\zeta B} &= 1 - 1,73\alpha(B/\lambda)^2; \\ \kappa_{\theta T} &= 1 - \frac{6\chi^3}{(1 + \chi)(1 + 2\chi)} kT + \frac{1,5\chi^3}{(2 - \chi)(2 + \chi)} (kT)^2 - \\ &\quad - \frac{\chi^3}{3(3 - 2\chi)(3 - \chi)} (kT)^3 + \dots; \\ \kappa_{\theta B} &= 1 - \sqrt{\alpha} (B/\lambda)^2,\end{aligned}\tag{3.37}$$

де $\chi = \frac{\delta}{\alpha}$ – коефіцієнт вертикальної повноти;

δ – коефіцієнт загальної повноти;

α – коефіцієнт повноти площі ВЛ.

У розділі 6 наведений спосіб визначення $\kappa_{\theta T}$ за допомогою допоміжних графіків, перерахованих заздалегідь.

Для зручності подальших розрахунків прийнято

$$\kappa_{\zeta} r_0 = r_m \quad \text{та} \quad \kappa_{\theta} \alpha_0 = \alpha_m, \quad (3.38)$$

де r_m – наведений радіус орбітального руху часток води,
 α_m – наведений максимальний кут хвильового схилу.

Таким чином, рівняння хитавиці корабля кінцевих розмірів на хвилюванні будуть мати вигляд

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right) \ddot{\zeta}_g + v_{33} \dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g = \\ & = \rho g S_0 r_m \cos \omega t - v_{33} r_m \omega \sin \omega t - \lambda_{33} r_m \omega^2 \cos \omega t; \\ & (J_x + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + v_{44} \dot{\theta} + D h_0 \theta = \\ & = D h_0 \alpha_m \sin \omega t + v_{44} \alpha_m \omega \cos \omega t - \lambda_{44} \alpha_m \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Ці рівняння мають універсальний характер, тому що для нескінченно малого корабля $r_m \rightarrow r_0$, $\alpha_m \rightarrow \alpha_0$, і рівняння автоматично перетворюються в рівняння (3.33) і (3.36) [24].

3.6 Розв'язок рівнянь хитавиці корабля на регулярному хвилюванні

Розділивши всі члени рівнянь (3.39) на відповідні перші коефіцієнти, отримаємо залежності

$$\begin{aligned} & \ddot{\zeta}_g + \frac{v_{33}}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}} \dot{\zeta}_g + \frac{\rho g S_0}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}} \zeta_g = \\ & = \frac{\rho g S_0}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}} r_m \cos \omega t - \frac{v_{33}}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}} r_m \omega \sin \omega t - \frac{\lambda_{33}}{\frac{D}{g} + \lambda_{33}} r_m \omega^2 \cos \omega t; \end{aligned}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}} \dot{\theta} + \frac{Dh_0}{J_x + \lambda_{44}} \theta = \frac{Dh_0}{J_x + \lambda_{44}} \alpha_m \sin \omega t + \frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}} \alpha_m \omega \cos \omega t - \frac{\lambda_{44}}{J_x + \lambda_{44}} \alpha_m \omega^2 \sin \omega t. \quad (3.40)$$

Увівши позначення відповідно до (3.11), (3.12) і (3.20), отримаємо

$$\begin{aligned} \ddot{\zeta}_g + 2v_\zeta \dot{\zeta}_g + n_\zeta^2 \zeta_g &= \\ &= n_\zeta^2 r_m \cos \omega t - 2v_\zeta r_m \omega \sin \omega t - \frac{k_\zeta}{1 + k_\zeta} r_m \omega^2 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Тут і далі за аналогією з формулою (3.20)

$$k_\zeta = \frac{\lambda_{33}}{\frac{D}{g}}. \quad (3.42)$$

Розв'язання проведено на прикладі рівняння бортової хитавиці. Це рівняння є диференціальним, другого порядку, лінійним, неоднорідним. Розв'язок такого рівняння шукається у вигляді суми двох розв'язків:

$$\theta = \theta_{\text{о.р.}} + \theta_{\text{ч.р.}}, \quad (3.43)$$

де $\theta_{\text{о.р.}}$ – загальний розв'язок однорідного рівняння, тобто рівняння, у правій частині якого стоїть 0 (рівняння хитавиці корабля на тихій воді). Такий розв'язок має загасаючий характер і досить швидко зникає. Його можна не враховувати у випадку тривалого впливу хвилювання;

$\theta_{\text{ч.р.}}$ – розв'язок неоднорідного рівняння у формі правої частини. Тоді справедливо

$$\theta = \theta_{\text{ч.р.}} = \theta_1 \sin \omega t + \theta_2 \cos \omega t. \quad (3.44)$$

Таким чином, можна відзначити, що на регулярному хвилюванні корабель здійснює коливання з частотою,

рівною частоті хвилювання. Така хитавиця називається *змушеною*. На нерегулярному ж хвилюванні при набіганні кожної нової хвилі збуджуються нові вільні коливання, а змушені не встигають розвинути. Така хитавиця називається *збуреною*. При цьому корабель здійснює коливання з власною частотою.

Визначивши похідні $\dot{\theta}$ та $\ddot{\theta}$, підставивши їх у вихідне рівняння та прирівнявши коефіцієнти окремо при $\sin \omega t$ й при $\cos \omega t$ ліворуч і праворуч, отримано розв'язок у вигляді

$$\theta_m = \alpha_m \sqrt{\frac{(n_\theta^2 - \frac{k_\theta}{1+k_\theta} \omega^2)^2 + 4v_\theta^2 \omega^2}{(n_\theta^2 - \omega^2)^2 - 4v_\theta^2 \omega^2}}; \quad (3.45)$$

$$\operatorname{tg} \delta_\theta = \frac{2v_\theta \omega^3}{(1+k_\theta) \left[(n_\theta^2 - \omega^2)(n_\theta^2 - \frac{k_\theta}{1+k_\theta} \omega^2) + 4v_\theta^2 \omega^2 \right]}, \quad (3.46)$$

де $\theta_m = \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2}$ – амплітуда змушеної хитавиці корабля на регулярному хвилюванні; $\delta_\theta = \arctg \frac{\theta_2}{\theta_1}$ – фаза коливань корабля відносно коливань хвильової поверхні. Вони виникають при переході до одночленної форми запису у розв'язку (3.44):

$$\theta = \theta_m \sin(\omega t - \delta_\theta). \quad (3.44')$$

Після ряду перетворень вирази (3.45) і (3.46) можна переписати в безрозмірній формі:

$$\frac{\theta_m}{\alpha_m} = \sqrt{\frac{(1 - \frac{k_\theta \varpi^2}{1+k_\theta})^2 + 4v_\theta^2 \varpi^2}{(1 - \varpi^2)^2 + 4v_\theta^2 \varpi^2}}; \quad (3.45')$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta} = \frac{2\bar{v}_{\theta} \varpi^3}{(1+k_{\theta}) \left[(1-\varpi^2) \left(1 - \frac{k_{\theta}}{1+k_{\theta}} \varpi^2 \right) + 4\bar{v}_{\theta}^2 \varpi^2 \right]}, \quad (3.46')$$

де $\varpi = \frac{\omega}{n_{\theta}}$ – безрозмірна частота хвилі;

$\frac{\theta_m}{\alpha_m} = |\Phi_{\theta\alpha}|$ – модуль передатної функції, або коефіцієнт динамічності, що характеризує здатність корабля як динамічної системи реагувати на зовнішнє збурювання.

Для кораблів, у яких дифракційні сили малі, часто нехтують ними, тобто в правих частинах рівнянь (3.40) залишаються тільки перші члени. Такі рівняння називаються скороченими:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33} \right) \ddot{\zeta}_g + v_{33} \dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g &= \rho g S_0 r_m \cos \omega t; \\ (J_x + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + v_{44} \dot{\theta} + D h_0 \theta &= D h_0 \alpha_m \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.40')$$

При цьому розв'язку (3.45')–(3.46') спростяться й вийдуть у вигляді

$$|\Phi_{\theta\alpha}| = \frac{\theta_m}{\alpha_m} = \frac{1}{\sqrt{(1-\varpi^2)^2 + 4\bar{v}_{\theta}^2 \varpi^2}}; \quad (3.47)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\theta} = \frac{2\bar{v}_{\theta} \varpi}{1-\varpi^2}. \quad (3.48)$$

Залежність $\frac{\theta_m}{\alpha_m} = f(\varpi)$ називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ). На рис. 3.10 наведена АЧХ для розв'язку у формі (3.47), на рис. 3.11 – у формі (3.45').

На всіх графіках спостерігаються *зони резонансів* при $\varpi = 1$ або $\omega = n_\theta$, тобто при збіганні частоти хвилювання із власною частотою корабля. Відношення $\frac{\theta_m}{\alpha_m}$ при цьому становить

$$\left(\frac{\theta_m}{\alpha_m} \right)_{\text{рез}} \approx \frac{1}{2\bar{v}_\theta}, \quad (3.49)$$

тобто воно зворотно-пропорційне безрозмірному коефіцієнту згасання.

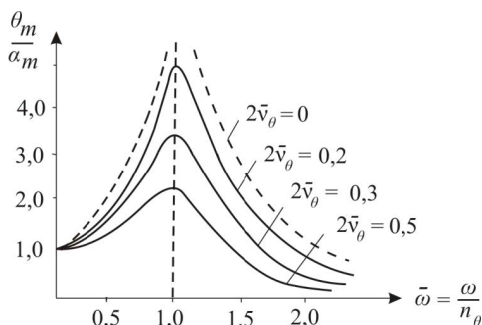


Рисунок 3.10 – АЧХ, отримана з розв’язку скороченого рівняння бортової хитавиці

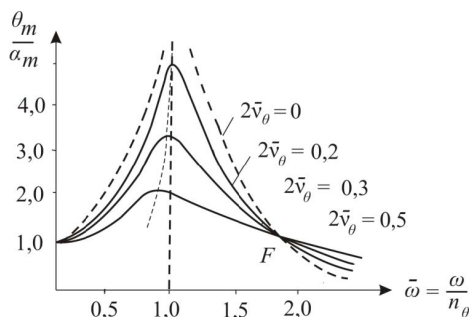


Рисунок 3.11 – АЧХ, отримана з розв’язку повного рівняння бортової хитавиці

Залежність $\delta_\theta = f(\varpi)$ називається фазово-частотною характеристикою (ФЧХ). Її вигляд при розв'язку рівнянь у формулі (3.48) та (3.46') наведений на рис. 3.12, *a* і *б* відповідно.

Необхідно відзначити, що при резонансі $\delta_\theta = \frac{\pi}{2}$.

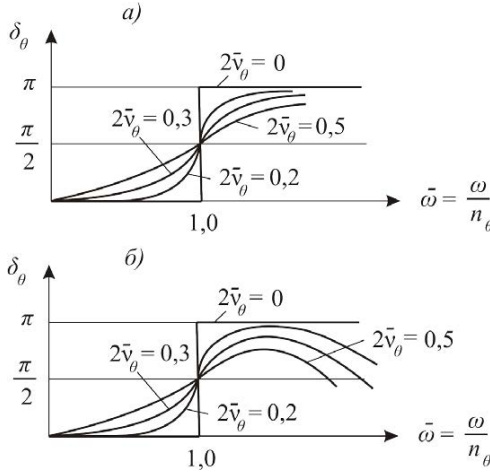


Рисунок 3.12 – ФЧХ, отримані з розв'язку скороченого *a* та повного *б* рівнянь хитавиці

Аналогічним способом можна одержати розв'язок повного рівняння вертикальної хитавиці:

– амплітудно-частотна характеристика

$$\frac{\zeta_{gm}}{r_m} = \sqrt{\frac{(1 - \frac{k_\zeta \varpi^2}{1 + k_\zeta})^2 + 4\bar{\nu}_\zeta^2 \varpi_\zeta^2}{(1 - \varpi_\zeta^2)^2 + 4\bar{\nu}_\zeta^2 \varpi_\zeta^2}}, \quad (3.50)$$

– фазово-частотна характеристика

$$\operatorname{tg} \delta_{\zeta} = \frac{2\bar{v}_{\zeta} \bar{\omega}_{\zeta}^3}{(1+k_{\zeta}) \left[(1-\bar{\omega}_{\zeta}^2) \left(1 - \frac{k_{\zeta}}{1+k_{\zeta}} \bar{\omega}_{\zeta}^2 \right) + 4\bar{v}_{\zeta}^2 \bar{\omega}_{\zeta}^2 \right]}, \quad (3.51)$$

де

$$\bar{\omega}_{\zeta} = \frac{\omega}{n_{\zeta}}; \quad (3.52)$$

ζ_{gm} – амплітуда вертикальної хитавиці.

Відповідні АЧХ наведені на рис. 3.13. Через те, що безрозмірний коефіцієнт затухання при вертикальній хитавиці звичайно має більшу величину, безрозмірні резонансні амплітуди невеликі.

Укорочені рівняння вертикальної хитавиці розглядати немає необхідності, оскільки дифракційні сили для цього виду хитавиці можуть бути одного порядку із криловськими. Знехтування дифракційними силами може призвести до значних похибок при визначенні амплітуд хитавиці.

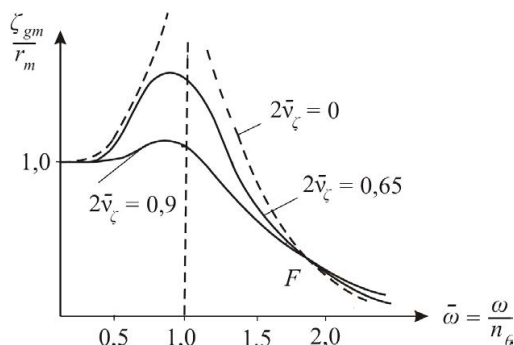


Рисунок 3.13 – Амплітудно-частотні характеристики вертикальної хитавиці

Питання для самоконтролю

1. Перерахуйте види хитавиці, які Вам відомі.
2. Які сили та моменти діють на корабель при хитавиці?
3. Дайте визначення терміна «логарифмічний декремент затухання».

4. Як враховується швидкість ходу корабля та курсовий кут до фронту хвиль на період бортової хитавиці?

5. Розрахуйте період хитавиці корабля, а також величини послідовних амплітуд бортової хитавиці на тихій воді при наступних даних: водотоннажність судна $D = 11000$ т, довжина $L = 110$ м, ширина $B = 15$ м, осадка $T = 7$ м, висота борту $H = 9$ м, коефіцієнт повноти водотоннажності $\delta = 0,70$, коефіцієнт повноти ватерлінії $\alpha = 0,80$, поперечна метацентрична висота $h = 0,70$ м, початковий кут крену $\theta = 5^\circ$, коефіцієнт затухання бортової хитавиці $\mu = 0,05$.

4 ЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ

Умови поздовжньої хитавиці корабля на хвилюванні суттєво відрізняються від умов його бортової хитавиці з наступних причин:

а) неможливо застосувати допущення про малість розмірів корабля у порівнянні з розмірами хвилі, тому зовсім неприпустиме нехтування кривизною хвилі вздовж корпусу корабля;

б) істотний взаємний вплив вертикальної та кільової хитавиці один на одного через те, що власні частоти цих видів хитавиці досить близькі;

в) поздовжня хитавиця у набагато більшому ступені залежить від швидкості ходу корабля, ніж бортова хитавиця у положенні лагом до хвилі.

При складанні рівнянь поздовжньої хитавиці використано наступні основні припущення:

1) справедливий *принцип суперпозиції* (накладення) діючих на корабель сил. Згідно з цим принципом окремі категорії сил не впливають одна на одну і їх можна просто підсумувати. Принцип суперпозиції досить точний при малих переміщеннях, швидкостях і прискореннях корабля, також при дії хвиль незначної висоти;

2) справедлива *гіпотеза плоских перетинів*. Результуючі гідродинамічних сил і моментів, що діють на різні ділян-

ки довжини корабля, неоднакові. Для наближеного їхнього підсумовування припущено, що площини дії всіх видів гідродинамічних сил паралельні площині мідель-шпангоута, тобто сили діють у площинах шпангоутів. Тоді головний вектор і головний момент діючих сил можуть бути отримані шляхом підсумовування цих сил і моментів, обчислених для елементарних площадок;

3) переміщення, швидкості та прискорення корабля малі, тому можна знехтувати їхніми добутками;

4) обводи корабля в межах зміни осадки прямобортні.

4.1 Виведення рівнянь поздовжньої хитавиці корабля на тихій воді

Для виведення рівнянь поздовжньої хитавиці корабля на тихій воді прийнято елементарний відсік довжиною dx на відстані x від площини Gyz у випадковий момент часу t , як це показано на рис. 4.1. Зміщення ЦТ корабля буде дорівнювати ζ_g і корабель отримає диферент із кутом ψ . Відсік буде брати участь у переносному русі разом із ЦТ і у відносному русі відносно осі Gy , яка проходить через ЦТ. Оскільки хитавиця мала, можна приблизно вважати, що $\cos \psi \approx 1$ і $\sin \psi \approx \psi$.

Об'єм відсіку по початкову ватерлінію буде дорівнювати $dV = \rho g \Omega dx$, де Ω – об'єм зануреної частини шпангоута. Крім цього об'єму під водою перебуває ще об'єм dv_i . Його висота дорівнює $\zeta = \zeta_g - x\psi$, а величина – $dv_i = 2y(\zeta_g - x\psi)dx$. Тоді сила плавучості, яка діє на відсік, складатиме

$$\begin{aligned} dP_{\zeta_{\text{гидрост}}} &= -\rho g(dV + dv_i) = \\ &= -\rho g \Omega dx - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi)dx. \end{aligned} \quad (4.1)$$

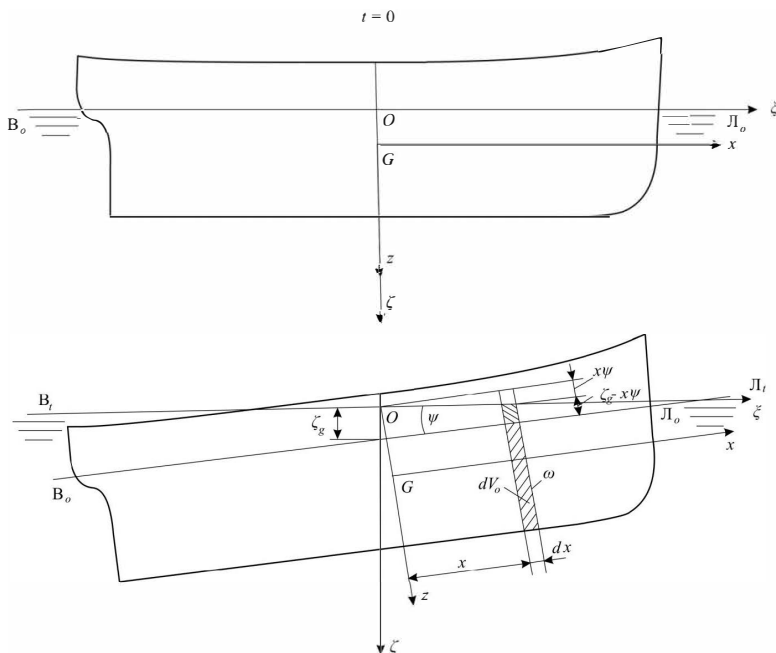


Рисунок 4.1 – Переміщення елементарного відсіку при поздовжній хитавиці

Швидкість переміщення відсіку та прискорення дорівнюють відповідно $\dot{\zeta} = \dot{\zeta}_g - x\dot{\psi}$ та $\ddot{\zeta} = \ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}$, тоді сила опору руху відсіку буде

$$dP_{\zeta_{\text{опору}}} = -v_{33}(x)\dot{\zeta}dx = -v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi})dx, \quad (4.2)$$

де $v_{33}(x)$ – коефіцієнт опору вертикальної хитавиці шпангоута в перетині x , а сила інерції заборотної води

$$dP_{\zeta_{\text{ін}}} = -\lambda_{33}(x)\ddot{\zeta}dx = -\lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})dx, \quad (4.3)$$

де $\lambda_{33}(x)$ – приєднана маса шпангоута.

Окрім сил гідромеханічної природи, на відсік будуть діяти сила ваги $p(x)dx$ та сила інерції маси відсіку

$$-\frac{p(x)}{g}(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})dx.$$

Сума всіх сил, що діють на елементарний відсік, буде дорівнювати

$$\begin{aligned} dP &= p(x)dx - \frac{p(x)}{g}(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})dx + dP_{\zeta_{\text{гидрост}}} + dP_{\zeta_{\text{опору}}} + dP_{\zeta_{\text{ін}}} = \\ &= [p(x) - \frac{p(x)}{g}(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}) - \rho g \Omega - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi) - \\ &\quad - v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi}) - \lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})] dx. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Вираз у квадратних дужках характеризує інтенсивність поперечного навантаження на одиницю довжини корабля. Статичний момент відносно осі Gy усіх сил, що діють на відсік, складатиме

$$\begin{aligned} dM &= -xdP = \\ &= -x[p(x) - \frac{p(x)}{g}(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}) - \rho g \omega - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi) - \\ &\quad - v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi}) - \lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})] dx. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Окрім наведених у цих виразах сил на елементарний відсік діють також внутрішні сили, створені впливом на нього сусідніх елементарних відсіків, однак при інтегруванні ці сили взаємно знищуються [7, 13].

Для корабля в цілому сума всіх сил і моментів повинна бути рівна 0, тобто

$$\begin{aligned} \int_L [p(x) - \frac{p(x)}{g}(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}) - \rho g \omega - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi) - \\ - v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi}) - \lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})] dx = 0; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\int_L -x \left[p(x) - \frac{p(x)}{g} (\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}) - \rho g \omega - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi) - \right. \\ \left. - v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi}) - \lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi}) \right] dx + \rho g V_0 a \psi = 0. \quad (4.7)$$

У рівнянні (4.7) додано момент $\rho g V_0 a \psi$, який виникає через те, що ЦТ і центр величини (ЦВ) корабля розташовані на різній висоті. Величина a – це перевищення ЦТ над ЦВ.

Нижче наведено значення ряду інтегралів у готовому вигляді:

$$\int_L p(x) dx = D \text{ – вага корабля (вагова водотоннажність);}$$

$$\int_L p(x)x dx = 0 \text{ – статичний момент сил ваги, рівний 0,}$$

тому що початок координат перебуває в ЦТ корабля;

$$\frac{1}{g} \int_L p(x)x^2 dx = J_y \text{ – момент сил інерції маси корпусу корабля;}$$

$$\rho g \int_L \omega dx = \rho g V_0 \text{ – сила плавучості по рівноважну ватерлінію;}$$

$$\rho g \int_L \omega x dx = 0 \text{ – статичний момент сил плавучості, рівний 0, тому що } x_c = x_g = 0;$$

$$\int_L 2y dx = S_0 \text{ – площа ватерлінії;}$$

$$\int_L 2yx dx = S_0 x_f \text{ – статичний момент площі ватерлінії}$$

відносно осі Gy ;

$$x_f \text{ – абсциса ЦТ площі ватерлінії;}$$

$\int_L 2yx^2 dx = I_y$ – момент інерції площі ватерлінії відносно осі Gy ;

$\int_L v_{33}(x) dx = v_{33}$ – коефіцієнт опору вертикальній хита-
виці корабля;

$\int_L v_{33}(x)x dx = v_{35}$ – статичний момент сил опору хитавиці
корабля відносно осі Gy ;

$\int_L v_{33}(x)x^2 dx = v_{55}$ – коефіцієнт опору кильовій хитавиці
корабля;

$\int_L \lambda_{33}(x) dx = \lambda_{33}$ – приєднана маса;
 $\int_L \lambda_{33}(x)x dx = \lambda_{35}$ – статичний момент приєднаної маси
корабля відносно осі Gy ;

$\int_L \lambda_{33}(x)x^2 dx = \lambda_{55}$ – момент інерції приєднаної маси ко-
рабля відносно осі Gy .

Підставимо значення інтегралів у вихідні вирази. Тоді отримаємо:

$$\begin{aligned} D - \frac{D}{g} \ddot{\zeta}_g - \rho g V_0 - \rho g S_0 \zeta_g + \rho g S_0 x_f \psi - \\ - v_{33} \dot{\zeta}_g + v_{35} \dot{\psi} - \lambda_{33} \ddot{\zeta}_g + \lambda_{35} \ddot{\psi} = 0; \\ - J_y \ddot{\psi} + \rho g S_0 x_f \zeta_g - \rho g I_y \psi + v_{35} \dot{\zeta}_g - \\ - v_{55} \dot{\psi} + \lambda_{35} \ddot{\zeta}_g - \lambda_{55} \ddot{\psi} + \rho g V_0 a \psi = 0. \end{aligned}$$

Після приведення подібних членів і зміни знаків остаточно отримаємо

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g - \lambda_{35}\ddot{\psi} - v_{35}\dot{\psi} - \rho g S_0 x_f \psi = 0; \quad (4.8)$$

$$(J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + v_{55}\dot{\psi} + D H_0 \psi - \lambda_{35}\ddot{\zeta}_g - v_{35}\dot{\zeta}_g - \rho g S_0 x_f \zeta_g = 0 \quad (4.8')$$

– відповідно рівняння вертикальної й поздовжньої хитавиці корабля на тихій воді без ходу.

При написанні (4.8) і (4.9) враховано, що $D = \rho g V_0$ та

$$-\rho g I_y \psi + \rho g V_0 a \psi = -\rho g V_0 R \psi + \rho g V_0 a \psi = -D(R - a)\psi = -D H_0 \psi,$$

де $R = \frac{I_y}{V_0}$ – поздовжній метacentричний радіус; H_0 – поздовжня метacentрична висота. Відповідно до рис. 4.2

$$a = z_w - z_p = z_g - z_c,$$

де z_w – апліката ЦВ корабля в координатах хитавиці; z_p – апліката ЦТ у координатах хитавиці; z_c – апліката ЦВ у координатах статики; z_g – апліката ЦТ у координатах статики.

Рівняння (4.8) розділяються при малих коливаннях і тоді отримуються раніше описані в п. 3.4 окремі рівняння вертикальної та кільової хитавиці на тихій воді.

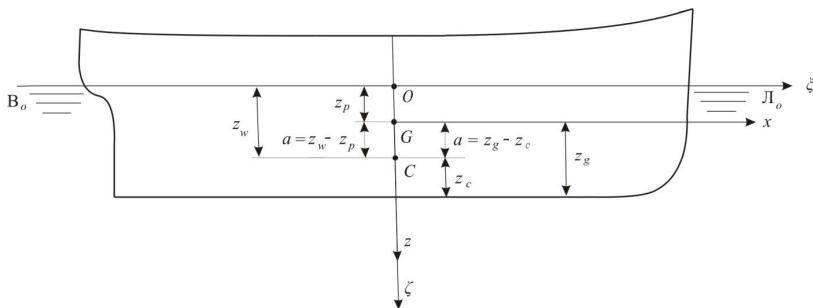


Рисунок 4.2 – Визначення величини a в різних системах координат

4.2 Урахування впливу швидкості ходу на поздовжню хитавицю корабля на тихій воді

Швидкість ходу впливає на поздовжню хитавицю подвійно:

1) змінюється обтікання корабля через появу поздовжніх складових швидкості та змінюється внаслідок цього тиск на змоченій поверхні корабля;

2) змінюється вертикальна швидкість обтікання кожної шпангоутної рами. Відповідно до рис. 4.3 при нахиленні корабля на кут ψ з'являється складова швидкості $v_0\psi$, тому швидкість обтікання відсіку буде складати $\dot{\zeta} = \dot{\zeta}_g - x\dot{\psi} + v_0\psi$, а прискорення $\ddot{\zeta} = \ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi} + v_0\dot{\psi}$.

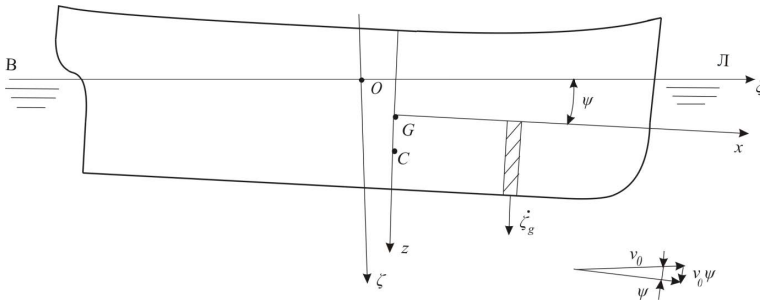


Рисунок 4.3 – Визначення додаткової швидкості обтікання шпангоута

Після всіх перетворень рівняння поздовжньої хитавиці на тихій воді з урахуванням швидкості ходу будуть мати такий вигляд

$$\left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g - \lambda_{35}\ddot{\psi} - (v_{35} - v_0 \lambda_{35})\dot{\psi} - (\rho g S_0 x_f - v_0 v_{33})\psi = 0; \quad (4.9)$$

$$(J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + \left(v_{55} + \frac{v_0^2}{\omega^2} v_{33}\right)\dot{\psi} + (DH_0 - v_0^2 \lambda_{33})\psi - \lambda_{35}\ddot{\zeta}_g - (v_{35} + v_0 \lambda_{33})\dot{\zeta}_g - (\rho g S_0 x_f + v_0 v_{33})\zeta_g = 0. \quad (4.9')$$

Якщо корабель буде симетричним відносно мідель-шпангоута, $v_{35}=0$; $\lambda_{35}=0$; $x_f=0$, то рівняння спростяться, але при наявності швидкості не розділяться:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g + v_0 \lambda_{33} \dot{\psi} + v_0 v_{33} \psi = 0; \\ (J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + (v_{55} + \frac{v_0^2}{\omega^2} v_{33})\dot{\psi} + \\ +(DH_0 - v_0^2 \lambda_{33})\psi - v_0 \lambda_{33} \dot{\zeta}_g - v_0 v_{33} \zeta_g = 0. \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.3 Рівняння поздовжньої хитавиці корабля на зустрічному хвилюванні без швидкості ходу

Для зустрічного хвилювання курсовий кут $\beta=180^\circ$ і рівняння хвильової поверхні прийме вигляд

$$\zeta_s = r_0 \cos(k\xi + \omega t) \approx r_0 \cos(kx + \omega t).$$

При дослідженні сил, які діють на відсік при хитавиці, можна використовувати принцип відносного руху. Відсік переміститься на відстань $\zeta - \zeta_{xb}$ зі швидкістю $\dot{\zeta} - \dot{\zeta}_{xb}$ та прискоренням $\ddot{\zeta} - \ddot{\zeta}_{xb}$. Відповідно сили гідромеханічної природи будуть складати

$$\begin{aligned} dP_{\zeta_{\text{гідрост}}} &= -\rho g(dV + dv) = -\rho g \omega dx - \rho g 2y(\zeta - \zeta_{xb})dx = \\ &= -\rho g \omega dx - \rho g 2y(\zeta_g - x\psi)dx + \rho g 2y\zeta_{xb} dx; \\ dP_{\zeta_{\text{опору}}} &= -v_{33}(x)(\dot{\zeta} - \dot{\zeta}_{xb})dx = -v_{33}(x)(\dot{\zeta}_g - x\dot{\psi})dx + v_{33}(x)\dot{\zeta}_{xb} dx; \\ dP_{\text{ін}} &= -\lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta} - \ddot{\zeta}_{xb})dx = -\lambda_{33}(x)(\ddot{\zeta}_g - x\ddot{\psi})dx + \lambda_{33}(x)\ddot{\zeta}_{xb} dx. \end{aligned}$$

Таким чином, у виразах для сил у порівнянні з тихою водою присутні члени, які залежать від хвилювання. Їх можна об'єднати як збудовуючі сили

$$dP_{\text{збур}} = \rho g 2y\zeta_{xb} dx + v_{33}(x)\dot{\zeta}_{xb} dx + \lambda_{33}(x)\ddot{\zeta}_{xb} dx,$$

а потім проінтегрувати окремо для всього корабля:

$$P_{\text{збур}} = \int_L dP_{\text{збур}} = \int_L \rho g 2y\zeta_{xb} dx + \int_L v_{33}(x)\dot{\zeta}_{xb} dx + \int_L \lambda_{33}(x)\ddot{\zeta}_{xb} dx. \quad (4.11)$$

Підставивши в (4.11)

$$\begin{aligned}\zeta_{\text{хв}} &= r_0 \cos(kx + \omega t) = r_0 \cos kx \cos \omega t - \sin kx \sin \omega t; \\ \dot{\zeta}_{\text{хв}} &= -\omega r_0 \cos kx \sin \omega t - \omega r_0 \sin kx \cos \omega t; \\ \ddot{\zeta}_{\text{хв}} &= -\omega^2 r_0 \cos kx \cos \omega t + \omega^2 r_0 \sin kx \sin \omega t,\end{aligned}\quad (4.12)$$

отримаємо,

$$\begin{aligned}P_{\text{збур}} &= \rho g r_0 \cos \omega t \int_L 2y \cos kx dx - \rho g \sin \omega t \int_L 2y \sin kx dx - \\ &- r_0 \omega \sin \omega t \int_L v_{33}(x) \cos kx dx - r_0 \omega \cos \omega t \int_L v_{33}(x) \sin kx dx - \\ &- r_0 \omega^2 \cos \omega t \int_L \lambda_{33}(x) \cos kx dx + r_0 \omega^2 \sin \omega t \int_L \lambda_{33}(x) \sin kx dx.\end{aligned}\quad (4.13)$$

Збурюючий момент складатиме

$$\begin{aligned}M_{\text{збур}} &= -\int_L x dP_{\text{збур}} = -\int_L \rho g 2xy \zeta_{\text{хв}} dx - \int_L v_{33}(x) x \dot{\zeta}_{\text{хв}} dx - \int_L \lambda_{33}(x) x \ddot{\zeta}_{\text{хв}} dx = \\ &= -\rho g r_0 \cos \omega t \int_L 2xy \cos kx dx + \rho g \sin \omega t \int_L 2xy \sin kx dx + \\ &+ r_0 \omega \sin \omega t \int_L v_{33}(x) x \cos kx dx + r_0 \omega \cos \omega t \int_L v_{33}(x) x \sin kx dx + \\ &+ r_0 \omega^2 \cos \omega t \int_L \lambda_{33}(x) x \cos kx dx - r_0 \omega^2 \sin \omega t \int_L \lambda_{33}(x) x \sin kx dx.\end{aligned}\quad (4.14)$$

Для спрощення виведення залежностей введено позначення

$$\begin{aligned}a_0 &= \int_L 2y \cos kx dx; & b_0 &= \int_L 2y \sin kx dx; \\ a'_0 &= \int_L v_{33}(x) \cos kx dx; & b'_0 &= \int_L v_{33}(x) \sin kx dx; \\ a''_0 &= \int_L \lambda_{33}(x) \cos kx dx; & b''_0 &= \int_L \lambda_{33}(x) \sin kx dx; \\ a_1 &= \int_L 2xy \cos kx dx; & b_1 &= \int_L 2xy \sin kx dx; \\ a'_1 &= \int_L v_{33}(x) x \cos kx dx; & b'_1 &= \int_L v_{33}(x) x \sin kx dx; \\ a''_1 &= \int_L v_{33}(x) x^2 \cos kx dx; & b''_1 &= \int_L v_{33}(x) x^2 \sin kx dx.\end{aligned}\quad (4.15)$$

Рівняння хитавиці корабля на хвилюванні будуть відрізнятися від рівнянь хитавиці на тихій воді наявністю в правих частинах збурюючих сил та моментів. Їх можна записати з урахуванням позначень (4.15) у вигляді

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g - \lambda_{35}\ddot{\psi} - v_{35}\dot{\psi} - \rho g S_0 x_f \psi = \\ & = r_0(\rho g a_0 - \omega b'_0 - \omega^2 a''_0)\cos\omega t + r_0(-\rho g b_0 - \omega a'_0 + \omega^2 b''_0)\sin\omega t; \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} & (J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + v_{55}\dot{\psi} + D H_0 \psi - \lambda_{35}\ddot{\zeta}_g - v_{35}\dot{\zeta}_g - \rho g S_0 x_f \zeta_g = \\ & = r_0(-\rho g a_1 + \omega b'_1 + \omega^2 a''_1)\cos\omega t + r_0(\rho g b_1 + \omega a'_1 - \omega^2 b''_1)\sin\omega t. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Рівняння (4.16) – рівняння вертикальної хитавиці корабля на хвилюванні, рівняння (4.17) – рівняння кільової хитавиці.

4.4 Рівняння поздовжньої хитавиці корабля, який рухається на зустрічному хвилюванні

Ліві частини рівнянь хитавиці корабля, який рухається зі швидкістю v_0 , на тихій воді були отримані в п. 4.2. Оскільки на хвилюванні корабель здійснює коливання із частотою ω_k (п. 3.5), то у лівих частинах рівнянь хитавиці будуть стояти ті ж вирази для сил і моментів, але залежні від ω_k , а в правих частинах – вирази, отримані в п. 4.3. Коефіцієнти правих частин не залежать від частоти ω_k , тому що вони пов'язані з амплітудами хвиль, які не повинні змінюватися від наявності хвиль. Тригонометричні функції будуть залежати від ω_k :

$$\begin{aligned} & \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33k}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33k}\dot{\zeta}_g + \rho g S_0 \zeta_g - \lambda_{35k}\ddot{\psi} - (v_{35k} - v_0 \lambda_{35k})\dot{\psi} - \\ & - (\rho g S_0 x_f - v_0 v_{33k})\psi = r_0(\rho g a_0 - \omega b'_0 - \omega^2 a''_0)\cos\omega_k t - \\ & - r_0(\rho g b_0 + \omega a'_0 - \omega^2 b''_0)\sin\omega_k t; \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned}
 & (J_y + \lambda_{55\kappa})\ddot{\psi} + (v_{55\kappa} + \frac{v_0^2}{\omega^2} v_{33\kappa})\dot{\psi} + (DH_0 - v_0^2 \lambda_{33\kappa})\psi - \lambda_{35\kappa} \ddot{\zeta}_g - \\
 & - (v_{35\kappa} + v_0 \lambda_{33\kappa})\dot{\zeta}_g - (\rho g S_0 x_f + v_0 v_{33\kappa})\zeta_g = \\
 & = -r_0(\rho g a_1 - \omega b_1' - \omega^2 a_1'') \cos \omega_\kappa t + r_0(\rho g b_1 + \omega a_1' - \omega^2 b_1'') \sin \omega_\kappa t. \quad (4.19)
 \end{aligned}$$

Рівняння (4.18) і (4.19) є звичайними лінійними диференційними рівняннями 2-го порядку, неоднорідними. Розв'язки їх шукаються у вигляді суми 2-х розв'язків: розв'язку однорідного рівняння (у правій частині рівняння становить 0) і розв'язку неоднорідного рівняння у формі правої частини.

Праві частини рівнянь (4.18) і (4.19) можна представити у вигляді $F_1 \cos \omega_\kappa t + F_2 \sin \omega_\kappa t$, тому їх розв'язок матиме вигляд

$$\zeta_g = \zeta_1 \cos \omega_\kappa t + \zeta_2 \sin \omega_\kappa t \quad \text{та} \quad \psi = \psi_1 \cos \omega_\kappa t + \psi_2 \sin \omega_\kappa t. \quad (4.20)$$

Після визначення похідних

$$\begin{aligned}
 \dot{\zeta}_g &= -\zeta_1 \omega_\kappa \sin \omega_\kappa t + \zeta_2 \omega_\kappa \cos \omega_\kappa t; \\
 \ddot{\zeta}_g &= -\zeta_1 \omega_\kappa^2 \sin \omega_\kappa t + \zeta_2 \omega_\kappa^2 \cos \omega_\kappa t;
 \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\psi} &= -\psi_1 \omega_\kappa \sin \omega_\kappa t + \psi_2 \omega_\kappa \cos \omega_\kappa t; \\
 \ddot{\psi} &= -\psi_1 \omega_\kappa^2 \sin \omega_\kappa t + \psi_2 \omega_\kappa^2 \cos \omega_\kappa t,
 \end{aligned} \quad (4.21')$$

підстановки їх у рівняння хитавиці та додавання коефіцієнтів окремо при $\sin \omega_\kappa t$ та $\cos \omega_\kappa t$ в лівій і правій частинах вийде система чотирьох алгебраїчних рівнянь для визначення чотирьох невідомих величин $\zeta_1, \zeta_2, \psi_1, \psi_2$. Вони будуть мати вигляд

$$\begin{aligned}
 & \left[\rho g S_0 - \omega_\kappa^2 \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33\kappa} \right) \right] \zeta_1 + \omega_\kappa v_{33\kappa} \zeta_2 - \left[(\rho g S_0 x_f - v_0 v_{33\kappa}) - \omega_\kappa^2 \lambda_{35\kappa} \right] \psi_1 - \\
 & - \omega_\kappa (v_{35\kappa} - v_0 \lambda_{33\kappa}) \psi_2 = r_0 \left(\rho g a_0 - \omega b_0' - \omega^2 a_0'' \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\omega_{\kappa} v_{33\kappa} \zeta_1 + \left[\rho g S_0 - \omega_{\kappa}^2 \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33\kappa} \right) \right] \zeta_2 + \omega_{\kappa} (v_{35\kappa} - v_0 \lambda_{33\kappa}) \psi_1 - \\
 & - \left[(\rho g S_0 x_f - v_0 v_{33\kappa}) - \omega_{\kappa}^2 \lambda_{35\kappa} \right] \psi_2 = -r_0 \left(\rho g b_0 + \omega a'_0 - \omega^2 b''_0 \right); \quad (4.22) \\
 & \left[(DH_0 - v_0^2 \lambda_{33\kappa}) - \omega_{\kappa}^2 (J_y + \lambda_{55\kappa}) \right] \psi_1 + \omega_{\kappa} \left(v_{55\kappa} + \frac{v_0^2}{\omega_{\kappa}^2} v_{33\kappa} \right) \psi_2 - \\
 & - \left[(\rho g S_0 x_f + v_0 v_{33\kappa}) + \omega_{\kappa}^2 \lambda_{35\kappa} \right] \zeta_1 - \omega_{\kappa} (v_{35\kappa} + v_0 \lambda_{33\kappa}) \zeta_2 = \\
 & = -r_0 \left(\rho g a_1 - \omega b'_1 - \omega^2 a''_1 \right); \\
 & -\omega_{\kappa} \left(v_{55\kappa} + \frac{v_0^2}{\omega_{\kappa}^2} v_{33\kappa} \right) \psi_1 + \left[(DH_0 - v_0^2 \lambda_{33\kappa}) - \omega_{\kappa}^2 (J_y + \lambda_{55\kappa}) \right] \psi_2 + \\
 & + \omega_{\kappa} (v_{35\kappa} + v_0 \lambda_{33\kappa}) \zeta_1 - \left[(\rho g S_0 x_f + v_0 v_{33\kappa}) + \omega_{\kappa}^2 \lambda_{35\kappa} \right] \zeta_2 = \\
 & = r_0 \left(\rho g b_1 + \omega a'_1 - \omega^2 b''_1 \right).
 \end{aligned}$$

Ця система рівнянь розв'язується будь-яким способом, наприклад, за допомогою визначників і т. д. Після знаходження ζ_1 , ζ_2 , ψ_1 , ψ_2 можна побудувати положення корабля на хвилюванні для ряду моментів часу і таким чином побачити, як у корабля заливається палуба або оголюється днище (на рис. 4.4 затоплені ділянки палуби заштриховано).

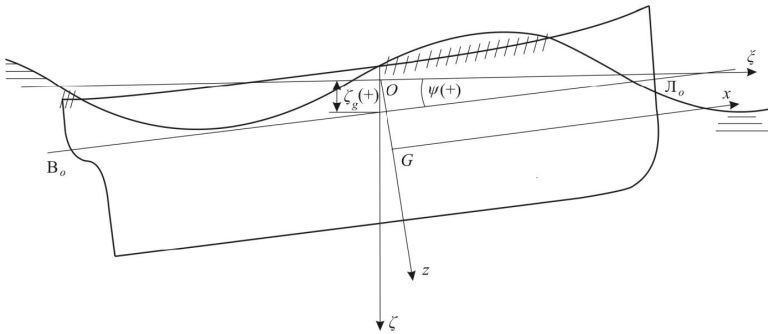


Рисунок 4.4 – До визначення положення корабля на хвилюванні

При цьому можна прогнозувати, як розставити надбудови та фальшборт, щоб уникнути заливання палуби, а також розв'язати інші питання населеності. При оголенні днища можна рекомендувати знизити швидкість ходу корабля.

4.5 Розрахунки та побудова кривих залиття

Для визначення у будь-який момент часу залитих водою ділянок палуби або ділянок, що оголюють днище (при цьому можуть виникнути слемінг, оголення гвинтів), треба зрівняти висоту підйому хвильових поверхонь у різних точках по довжині корабля з висотою надводного борту, а глибину впадини хвильової поверхні – з осадкою. Таким чином, необхідно перевірити дві нерівності:

$$1) z_g(x) \leq z_n(x) \text{ – умова залиття палуби корабля; } \quad (4.23)$$

$$2) z_g(x) \geq T(x) \text{ – умова оголення днища. } \quad (4.24)$$

У цих нерівностях $z_g(x)$ – рівняння хвильової поверхні в координатах корабля, тобто проєкція хвилі на борт корабля; $z_n(x)$ – рівняння лінії палуби біля борту; $T(x)$ – рівняння кильової лінії. При цьому треба пам'ятати, що позитивні аплікати відкладаються вниз від ватерлінії, а негативні – вверх.

Через те, що залежності $z_g(x)$; $z_n(x)$ та $T(x)$ можуть бути досить складними, зручніше перевірку цих нерівностей робити графічно. Для цього використовують криві залиття, запропоновані І.Г. Хановичем.

При виведенні рівнянь поздовжньої хитавиці корабля розглянуто рух елементарного відсіку в перетині x щодо поверхні води $\zeta(x) - \zeta_g(x)$. У зверненому русі, якщо корабель вважати непохитним, проєкція хвилі на борт корабля в цьому ж перетині буде дорівнювати $z_g(x) = \zeta_g(x) - \zeta(x)$. З урахуванням того, що $\zeta(x) = \zeta_g - x\psi$, остаточно отримано

$$z_g(x) = \zeta_g(x) - \zeta_g + x\psi, \quad (4.25)$$

де $\zeta_*(x) = r_0 \cos(kx + \omega_k t)$ – рівняння хвилі в системі координат $O\xi\eta\zeta$.

Після підстановки в (4.25)

$$\zeta_g = \zeta_1 \cos \omega_k t + \zeta_2 \sin \omega_k t \quad \text{і} \quad \psi = \psi_1 \cos \omega_k t + \psi_2 \sin \omega_k t,$$

а також

$$\zeta_*(x) = r_0 \cos(kx + \omega_k t) = r_0 \cos kx \cos \omega_k t - r_0 \sin kx \sin \omega_k t$$

отримано

$$\begin{aligned} z_g = (r_0 \cos kx - \zeta_1 + x\psi_1) \cos \omega_k t + (-r_0 \sin kx - \zeta_2 + x\psi_2) \sin \omega_k t = \\ = F_1(x) \cos \omega_k t + F_2(x) \sin \omega_k t, \end{aligned} \quad (4.26)$$

де

$$F_1(x) = r_0 \cos kx - \zeta_1 + x\psi_1 \quad \text{і} \quad F_2(x) = -r_0 \sin kx - \zeta_2 + x\psi_2.$$

Вираз (4.24) можна привести до одночленної форми

$$z_g = z_m(x) \cos(\omega_k t - \varepsilon),$$

де $z_m(x) = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ – амплітуда коливань рівня води щодо корпусу корабля в кожному перетині x ; ε – фаза.

Розрахувавши значення $z_m(x)$ для 10–16 шпангоутів, відклавши їх від КВЛ вниз і вгору, будуть отримані точки, які необхідно з'єднати плавними кривими (рис. 4.5). Ці лінії будуть кривими залиття, які показують ті граничні положення рівня води відносно корпусу корабля в перетині x і будуть досягатися протягом періоду коливань корабля. Криві залиття – по суті лінії, які обгинають хвилі, що пробігають біля борту корабля протягом періоду [22, 23].

Якщо криві залиття виходять за межі бортової лінії палуби і виконується умова (4.23) – палуба заливається. Якщо криві виходять за межі лінії кіля і виконується умова (4.24) – днище оголюється. На рис. 4.5 місця заливання палуби та оголення днища заштриховані.

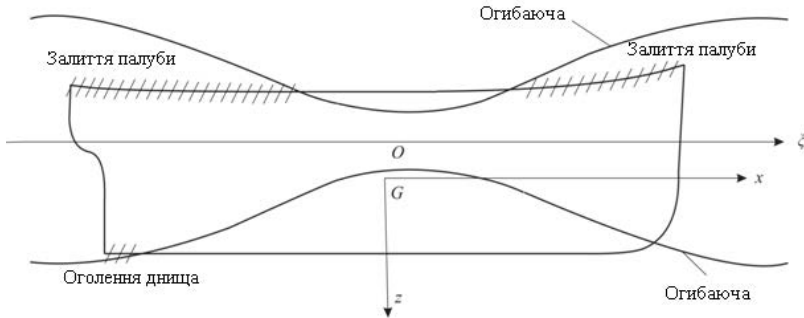


Рисунок 4.5 – Криві залиття

Питання для самоконтролю

1. Опишіть алгоритм побудови кривих залиття палуби.
2. Сформулюйте умову оголення днища корабля при поздовжній хитавиці.
3. Напишіть рівняння поздовжньої хитавиці корабля на зустрічному хвилюванні без швидкості ходу. Які параметри входять до нього?
4. Опишіть основні фази процесу залиття палуби корабля (рис. 4.6).

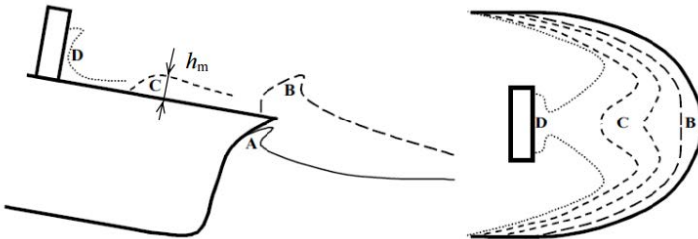


Рисунок 4.6 – Основні фази залиття палуби корабля

5 ЗАХОДИ БОРОТЬБИ ЗІ ШКІДЛИВИМИ НАСЛІДКАМИ ХИТАВИЦІ

Головним завданням курсу хитавиці корабля є не тільки вивчення хитавиці як явища, але й розв'язання практичного завдання про те, якими способами можна зменшити шкідливі наслідки хитавиці. Хитавиця корабля повинна бути помірною, тобто невеликою по амплітуді, та плавною. Залежно від призначення корабля, від роду перевезеного вантажу, від вимог міцності призначаються ті або інші вимоги, наприклад, до максимальних кутів нахилення або до сумарних прискорень у заданій точці корабля (на носу, на бортах, у штурманській рубці тощо). Ці вимоги вивчаються в спеціальних курсах. У даному посібнику розглянуто загальні принципи забезпечення помірності хитавиці.

Існують три групи заходів щодо зменшення наслідків хитавиці:

- проєктні;
- конструктивні;
- експлуатаційні.

Проєктні заходи проводяться ще в процесі проєктування корабля. Це, як правило, призначення таких головних розмірювань, форми корпусу, вагового навантаження і т. п., які забезпечують помірну хитавицю. Наприклад, вибір шпангоутів, близьких за формою до прямокутників, приводить до збільшення опору хитавиці, і як результат – зменшення амплітуд. Підвищення положення центру ваги приводить до

зменшення метацентричної висоти, що також є сприятливим чинником. У той же час корабель – це найскладніша система, тому такі заходи повинні проводитися дуже обережно, з урахуванням зміни інших морехідних або експлуатаційних якостей, що іноді можуть мати несприятливий характер. Завдання оптимізації якостей корабля є дуже складним та комплексним.

Конструктивні заходи передбачають встановлення тих або інших заспокоювачів хитавиці.

Експлуатаційні заходи передбачають вибір судноводієм раціональної швидкості та курсового кута відносно морських хвиль [6].

5.1 Вплив швидкості ходу та курсу корабля на хитавицю

5.1.1 Вплив швидкості ходу на опір хитавиці

Швидкість ходу впливає на опір хитавиці. Сьогодні це питання ще активно вивчається. Дослідження показали, що коефіцієнт затухання бортової хитавиці на ходу більше, ніж під час стоянки на якорі або швартовах. У той же час для поздовжньої хитавиці при деяких швидкостях може бути збільшення опору хитавиці, при деяких зменшення, особливо при русі корабля назустріч хвилі.

Пояснюються ці особливості тим, що зміна опору на ходу обумовлена трьома причинами.

1. Якщо розглядати корабель як крило малого подовження, то збільшення моменту опору бортової хитавиці обумовлене через виникнення на нахиленому корпусі піднімальної сили, спрямованої проти нахилення. Використовуючи це положення, А.Н. Холодилін запропонував наступну емпіричну формулу для додавання до безрозмірного коефіцієнта затухання [8]:

$$2 \Delta \bar{v}_{\theta u} = \frac{0,2}{\delta} \frac{T}{B} \frac{T}{h_0} \sqrt{\frac{L}{g T_0^2}} Fr, \quad (5.1)$$

де δ – коефіцієнт загальної повноти корабля;

T – осадка корабля, м;

B – ширина корабля, м;

L – довжина корабля, м;

h_0 – поперечна метацентрична висота, м;

g – прискорення вільного падіння, 9,8 м/с²;

T_0 – власний період бортової хитавиці, с;

$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{gL}}$ – безрозмірна швидкість – число Фруда.

Г.В. Соболев запропонував теоретичну формулу [4, 17]

$$\Delta \bar{v}_{\theta u} = \frac{0,23 Fr}{\delta \left(\frac{B}{T} - 1 \right) \sqrt{\frac{h_0}{L} \frac{L}{B}}}. \quad (5.2)$$

Обидві ці формули дають близькі результати, однак при більших швидкостях трохи занижують добавки.

2. С.Н. Благовещенський [8] припустив, що причиною виникнення додаткового опору є необхідність порушення при переході корабля в нове місце нової системи корабельних хвиль, на що витрачається багато енергії, у той час як на стоянці спочатку хвилі збурюються, а потім витрачається зовсім небагато енергії тільки на їхню підтримку.

Наближена формула, запропонована С.Н. Благовещенським,

$$\Delta \bar{v}_{\theta u} = \bar{v}_{\theta} \cdot 3,3 Fr \quad (5.3)$$

є більш повною та враховує обидві причини виникнення додаткового опору.

3. При поздовжній хитавиці в процесі визначення опору корпусу корабля, як правило, підсумуються коефіцієнти опору вертикальної хитавиці шпангоутів. Величини цих

коефіцієнтів значною мірою залежать від частоти хитавиці, яка дорівнює частоті, що задається, ω_k (п. 3.5). При збільшенні швидкості ходу ці частоти стають вище, а коефіцієнти опору менше. Це легко прослідковується в практичних розрахунках поздовжньої хитавиці.

5.1.2 Вплив швидкості ходу та курсу корабля на частоту збурюючих сил і моментів

У цьому пункті більш докладно проаналізовано формулу (3.26) для визначення ω_k :

$$\omega_k = \omega \left(1 - \frac{u_0}{c} \cos \beta \right). \quad (5.4)$$

Величина частоти, яка задається, залежить від співвідношення швидкості ходу корабля u_0 та швидкості хвилі c , а також від курсового кута β . Саме із цією частотою хвилі будуть впливати на корабель, тобто вона буде частотою сил та моментів збурення.

Існує ряд основних положень корабля відносно хвиль.

1. Курсовий кут $\beta = 0$. Відповідно до рис. 3.1 хвилі й корабель ідуть в одному напрямку – попутне хвилювання. При

цьому $\cos \beta = 1$ і $\omega_k = \omega \left(1 - \frac{u_0}{c} \right)$.

Якщо $u_0 = c$, корабель відносно хвилі не рухається. Вийде, що $\omega_k = 0$, тобто частота збурюючих сил і моментів дорівнює 0. Таке положення називається статичною постановкою корабля на хвилю.

Якщо $u_0 = 0$, вийде $\omega_k = \omega$.

Якщо $u_0 > c$, то $\omega_k < 0$, але фізично це неможливо й означає, що корабель обганяє хвилі. У цьому випадку частоту треба визначати по абсолютній величині, тобто $\omega_k = \left| \omega \left(1 - \frac{u_0}{c} \right) \right|$.

2. Курсовий кут $\beta = \pi/2$. У цьому випадку $\cos \beta = 0$ і $\omega_k = \omega$.

3. Курсовий кут $\beta = \pi$. У цьому випадку $\cos \beta = -1$ і $\omega_{\kappa} = \omega(1 + \frac{u_0}{c})$.

Якщо задати $u_0 = c$, вийде $\omega_{\kappa} = 2\omega$, при $u_0 = 2c$ виходить $\omega_{\kappa} = 3\omega$ і т. п.

Таким чином, діапазон зміни ω_{κ} лежить у межах від 0 до практично нескінченного значення, і завжди можливо, що частота, яка задається, стане рівною власній частоті або бортової хитавиці, або кільовій і вертикальній, тобто завжди можливе виникнення резонансних режимів для того чи іншого виду хитавиці. Ці режими можна визначити з рівностей $n_{\theta} = \omega_{\kappa} = \omega(1 - \frac{u_0}{c} \cos \beta)$ або $n_{\psi} = \omega_{\kappa} = \omega(1 - \frac{u_0}{c} \cos \beta)$.

Але більші амплітуди хитавиці виникають не тільки при резонансах, а взагалі в найближчих зонах, приблизно при $0,7 n_{\theta} \leq n_{\theta} \leq 1,3 n_{\theta}$ та $0,7 n_{\psi} \leq n_{\psi} \leq 1,3 n_{\psi}$. Це зрозуміло при розгляді амплітудно-частотних характеристик.

Для того, щоб судноводій міг уникнути попадання в резонансні зони, у процесі проектування для нього розраховується альбом кругових діаграм, форма яких була запропонована В.М. Власовим [1, 5]. На рис. 5.1 наведена кругова діаграма, на якій у вигляді заштрихованих зон нанесені несприятливі комбінації u_0 та β , при яких хитавиця буде посиленою. Судноводію необхідно обирати раціональну швидкість ходу або курсовий кут для виходу із небезпечної зони.

На діаграмі напрямом гребенів – вертикальне, напрямом перегону хвиль – праворуч-ліворуч. Вихідні із центру промені представляють напрямки швидкості ходу корабля, а радіуси концентричних окружностей – величини швидкості ходу корабля у вузлах. Курсові кути показані через 15° . Діаграми симетричні відносно прямої $0...180^\circ$ і тому викреслюється тільки половина діаграм. Кожна діаграма

будується для певної довжини хвилі λ і певних періодів або частот бортової та кільової хитавиці корабля.

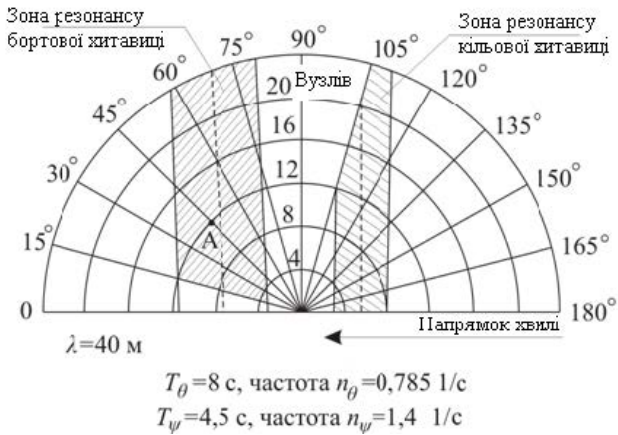


Рисунок 5.1 – Кругова діаграма Власова

Кожному значенню швидкості ходу корабля u_0 і курсового кута β на діаграмах відповідає певна зображувальна точка, і, навпаки, кожній точці діаграми відповідають певні значення швидкості ходу та курсового кута. Наприклад, швидкості 12 вузлів і куту $\beta = 45^\circ$ відповідає точка А. При постійній швидкості ходу та мінливому курсовому куті зображувальна точка переміщається по окружності; при незмінному курсовому куті та мінливій швидкості та ж точка переміщується вздовж променя. Якщо при одночасній зміні швидкості й курсу добуток $u_0 \cos \beta$ залишається постійним, то точка А переміщується по вертикалі.

Діаграми викреслюються для ряду довжин хвиль і власних частот або періодів хитавиці, можливих при експлуатації даного корабля. Власна частота кільової хитавиці в умовах плавання корабля змінюється дуже мало, тому для всіх діаграм її можна вибрати постійною (наприклад, осереднену).

Хвилювання передбачається регулярним, тому на реальному морському хвилюванні точність діаграми може знижуватися. Але якщо врахувати, що судноводій довжину хвилі буде оцінювати візуально, період хитавиці також визначається приблизно, для «грубого» орієнтування точності діаграм цілком вистачає. Далі необхідно використовувати власну морську практику.

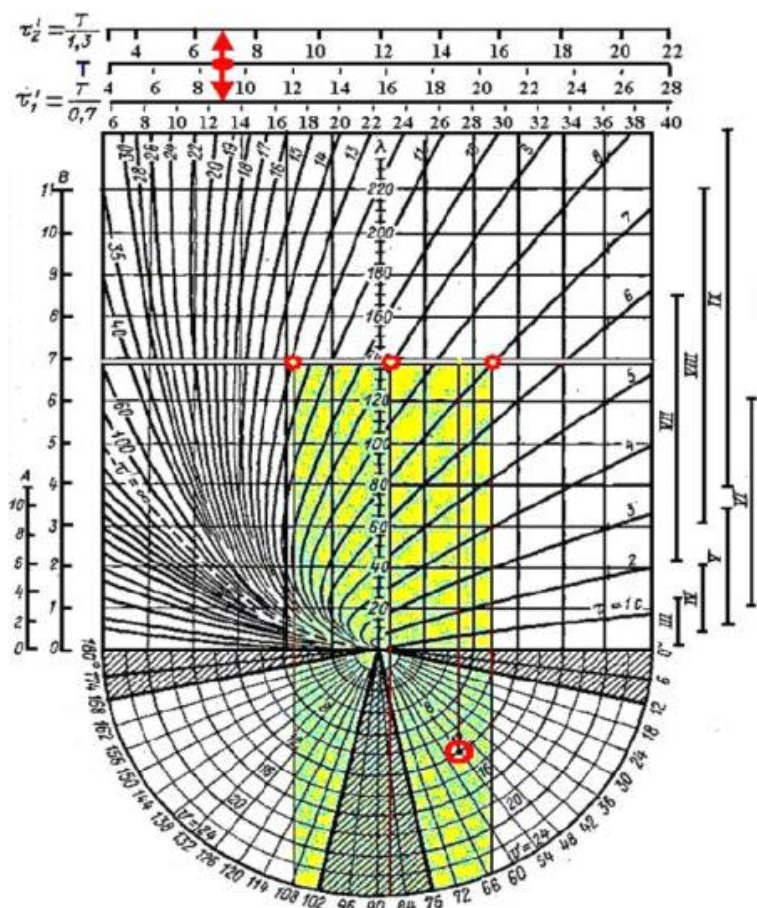


Рисунок 5.2 – Штормова діаграма професора Ю.В. Ремеза [5]

Іноді, якщо не вдається одержати необхідні значення швидкості ходу або значно відхилятися від заданого напрямку руху, кораблю доводиться рухатися зигзагом.

Також широке розповсюдження отримала штормова діаграма професора Ю.В. Ремеза (рис. 5.2). На рисунку наведено приклад визначення резонансних курсових кутів при довжині хвилі $\lambda = 140$ м, періоді власних бортових коливань корабля $T_0 = 9$ с і швидкості ходу 12 вузлів. За допомогою діаграми також може бути розв'язана і зворотна задача – визначення безпечної швидкості при заданому курсовому куті.

5.1.3 Вплив курсу корабля на амплітуди збурюючих сил

При русі корабля з довільним курсовим кутом (косим курсом) відносно хвилювання корабель буде здійснювати всі види хитавиці. Для прикладних розрахунків доцільно обмежитись розглядом вертикальної, бортової та кільової хитавиці. Найбільш цікавою інформацією при цьому є вплив курсового кута на амплітуди збурюючих сил та моментів для цих видів хитавиці.

Минаючи повз корабель хвиля буде мати висоту $2r_0$, але довжина хвилі буде залежати від курсового кута. Відповідно до рис. 5.3 довжину хвилі при розрахунках кільової та вертикальної хитавиці треба визначати вздовж діаметральної площини. Із трикутника ABC зрозуміло, що $\lambda_\psi = \lambda / \cos \beta$. При розрахунках бортової хитавиці довжину хвилі треба брати вздовж мідель-шпангоута. Із трикутника $A_1B_1C_1$ зрозуміло, що $\lambda_\theta = \lambda / \sin \beta$. Тоді кути хвильового профілю будуть рівні відповідно

$$\begin{aligned}\alpha_\psi &= \frac{2\pi r_0}{\lambda_\psi} = \frac{2\pi r_0 \cos \beta}{\lambda} = \alpha_0 \cos \beta; \\ \alpha_\theta &= \frac{2\pi r_0}{\lambda_\theta} = \frac{2\pi r_0 \sin \beta}{\lambda} = \alpha_0 \sin \beta.\end{aligned}\tag{5.5}$$

Таким чином, у виразах для збурюючих моментів замість кутів α_0 необхідно підставляти α_ψ та α_θ .

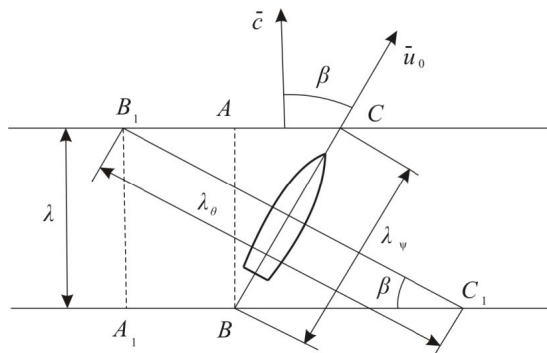


Рисунок 5.3 – Визначення довжин хвиль, які викликають кильову та бортову хитавицю корабля на косому хвилюванні

Але, крім цього, змінюються також поправочні коефіцієнти, які враховують кінцевість розмірів корабля. Тобто замість коефіцієнта κ_θ необхідно використовувати коефіцієнт $\kappa_{\theta\beta} = \kappa_{\theta T} \kappa_{\theta B\beta} \kappa_{\theta L\beta}$, який дорівнює добутку трьох коефіцієнтів.

Коефіцієнт $\kappa_{\theta T} = f(\frac{T}{\lambda})$ характеризує розподіл тисків хвилі по глибині. Цей розподіл не залежить від курсового кута [18].

Коефіцієнт $\kappa_{\theta B\beta}$ визначається по формулі, виведеній раніше для коефіцієнта $\kappa_{\theta B}$, тільки замість λ у неї треба підставляти $\lambda\theta$. Таким чином, $\kappa_{\theta B\beta} = 1 - \sqrt{\alpha}(\frac{B \sin \beta}{\lambda})^2$.

Коефіцієнт $\kappa_{\theta L\beta} = f(\frac{L \cos \beta}{\lambda})$ враховує вплив довжини корабля на збурюючі сили. Цей вплив проявляється через те, що в різних перетинах по довжині корабля кут хвильового схилу має різне значення (рис. 5.4, перетини 1-1, 2-2, 3-3).

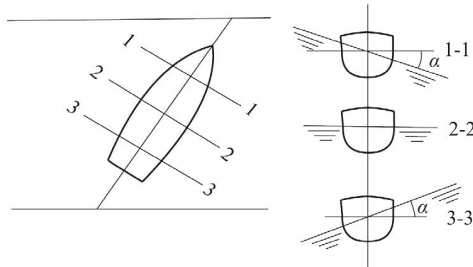


Рисунок 5.4 – Розподіл кутів хвильового схилу по довжині корабля на косому хвилюванні

Визначити коефіцієнт $\kappa_{\theta L\beta}$ можна за графіком, наведеним на рис. 5.5.

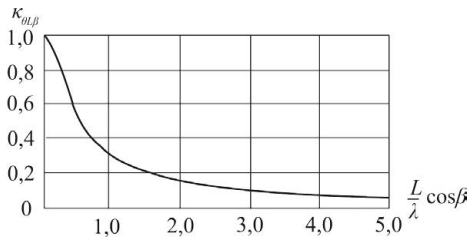


Рисунок 5.5 – Редукційний коефіцієнт, який враховує вплив довжини корабля на амплітуди збурюючих сил при його русі з курсовим кутом до хвилювання

5.2 Заспокоювачі хитавиці корабля

5.2.1 Загальні принципи стабілізації хитавиці

Загальні принципи стабілізації хитавиці корабля можна сформулювати, розглянувши формули для власного періоду бортової хитавиці

$$T_{\theta} = 2\pi \sqrt{\frac{J_x + \lambda_{44}}{Dh_0}} \quad (5.6)$$

та для безрозмірного коефіцієнта затухання бортової хитавиці

$$2\overline{v}_\theta = \frac{2v_\theta}{n_\theta}. \quad (5.7)$$

Якщо в (5.7) підставити

$$\frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}} = 2v_\theta \quad (5.8)$$

та

$$n_\theta = \sqrt{\frac{Dh_0}{J_x + \lambda_{44}}}, \quad (5.9)$$

отримаємо

$$2\overline{v}_\theta = \frac{2v_\theta}{n_\theta} = \frac{v_{44}}{J_x + \lambda_{44}} \sqrt{\frac{J_x + \lambda_{44}}{Dh_0}} = \frac{v_{44}}{\sqrt{(J_x + \lambda_{44})Dh_0}}. \quad (5.10)$$

Як випливає з формули (5.5), існує кілька способів збільшення безрозмірного коефіцієнта затухання, а, отже, зменшення амплітуд хитавиці корабля на хвилюванні.

1. *Зменшення величини $J_x + \lambda_{44}$.* Цього можна досягти за рахунок зменшення моменту інерції маси корпусу або за рахунок зменшення приєднаного моменту інерції. Можливості їх зменшення досить обмежені, до того ж такий шлях взагалі нераціональний, тому що відповідно до (5.6) власний період хитавиці зменшується. В той же час саме із власним періодом корабель знаходиться на нерегулярному хвилюванні. Хитавиця стає різкою, рвучкою, прискорення при хитавиці зростають, що значно погіршує умови населеності (рис. 5.5).

2. *Збільшення коефіцієнта опору v_{44} .* Цього можна досягти в процесі проектування за допомогою раціонального вибору форми корпусу корабля, наприклад, з більшим коефіцієнтом повноти й з гострими скуловими утворами. Якщо такі форми корпусу застосувати не можна, установлюють скулові кілі. Опір хитавиці зростає за рахунок збільшення хвилеутворення на корпусі та за рахунок утворення вихо-

рів на виступах корпусу. На рис. 5.6 видно, що ефективність збільшення опору хитавиці більша. Амплітуди хитавиці можуть зменшитися в 2–3 рази. Існують заспокоювачі, в яких стабілізуючий момент створюється за рахунок переміщення твердого або рідкого вантажу в протифазі із збуджуючими моментами. Результат їх дії такий же, як і при збільшенні опору.

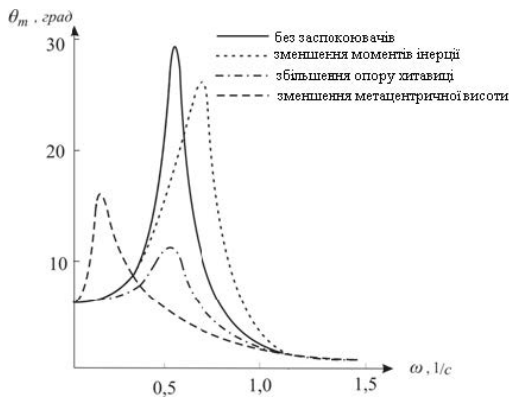


Рисунок 5.6 – Амплітудно-частотні криві $\theta_m = f(\omega)$ для корабля з різними принципами стабілізації хитавиці

3. *Зменшення метацентричної висоти.* Як видно на рис. 5.5, ефективність цього заходу в зоні резонансу може бути ще більше, ніж ефективність кілів, до того ж хитавиця корабля стає плавною за рахунок збільшення власного періоду. Ще в процесі проєктування кораблів намагаються в такий спосіб розташувати вантажні приміщення таким чином, щоб метацентрична висота була якнайменша (не порушуючи вимоги до остійності корабля), а в процесі експлуатації стежити за тим, щоб метацентрична висота не була надмірною. Існують також спеціальні заспокійливі цистерни, за допомогою яких можна зменшувати метацентричну висоту, набираючи в них воду та створюючи велику вільну поверхню.

5.2.2 Класифікація заспокоювачів хитавиці

Усі види заспокоювачів хитавиці призначають, в основному, для зменшення динаміки бортової хитавиці. Ефективно зменшити амплітуди вертикальної та кільової хитавиці в наш час майже неможливо.

Засоби зменшення бортової хитавиці суден передбачають використання досить різноманітних пристроїв, які сильно відрізняються один від одного як за принципом дії, так і за конструктивним виконанням. Однак усі види заспокоювачів хитавиці призначені для створення додаткового стабілізуючого моменту, дія якого повинна привести до заспокоєння хитавиці.

За природою сил, які утворюють стабілізуючий момент, усі види заспокоювачів хитавиці можуть бути розбиті на три групи. Для першої групи стабілізуючий момент створюється дією сил ваги, для другої – дією гідродинамічних сил, а для третьої – гіроскопічними силами. За принципом роботи вони можуть бути розбиті на два основні види: пасивні та активні. Пасивні заспокоювачі приводяться в дію за рахунок енергії, яка створена хитавицею корабля, і не вимагають додаткових витрат потужності. Робота активних заспокоювачів здійснюється за рахунок окремого джерела енергії у вигляді спеціального механізму, тобто пов'язана з деякою витратою потужності, а його керування виконується автоматичним регулюючим пристроєм [10, 17].

Не всі зазначені в табл. 5.1 види заспокоювачів хитавиці одержали практичне застосування. Наприклад, тверді вантажі, які переміщаються, були застосовані лише в дослідних установках. Принцип дії їх полягає в тому, що вантаж переміщається в площині шпангоута по криволінійних рейках, створює своєю вагою стабілізуючий момент. Застосування таких заспокоювачів не мало успіху внаслідок небезпеки, яка представляється для корабля твердим вантажем, який

рухається, незручності розміщення, труднощі керування, шуму, створюваного пристроєм. Не одержали поки також практичного застосування заспокоювачі, в яких для створення стабілізуючого моменту використовуються різного типу рушії (ротори, водомети, крильчасті рушії і т. п.). Вони є поки лише предметом теоретичних досліджень і багаточисельних винахідницьких пропозицій.

Таблиця 5.1 – Класифікація заспокоювачів хитавиці

Природа сил, яка утворює стабілізуючий момент	Принцип роботи	
	Пасивні заспокоювачі	Активні заспокоювачі
Сили ваги	Пасивні тверді вантажі	Активні тверді вантажі
	Пасивні цистерни I і II роду різних конструкцій	Активні цистерни I і II роду різних конструкцій
Гідродинамічні сили	Скулові кілі	Бортові керовані рули різних конструкцій
	Пасивні плавці	Заспокоювачі з рушіями різних конструкцій
Гіроскопічні сили	Пасивні гіростабілізатори	Активні гіростабілізатори

5.2.3 Принципи дії деяких найпоширеніших типів заспокоювачів

Скулові кілі

Скулові кілі – це довгі пластини, встановлені в районі скули по лінії току (рис. 5.6). Представляючи досить просту конструкцію, що не займає корисних об’ємів усередині корабля і створюючи разом з тим помітний заспокійливий ефект, скулові кілі одержали найбільше поширення і в наш час застосовуються у всіх флотах світу.

Дія скулових кілів полягає у штучному збільшенні опору хитавиці, тому вони найбільш ефективні при великих амплітудах хитавиці в зоні резонансу.

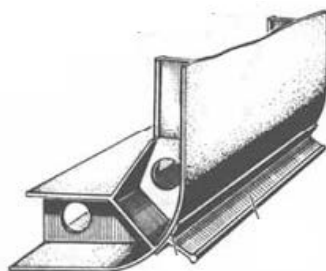


Рисунок 5.6 – Скуловий кіль

Як правило, сумарна площа скулових кілів приймається від 2 до 4 % від L_B , висота кілів від 0,3 до 1,2 м залежно від типу корабля, у середньому 3...5 % від ширини корабля. Довжина їх становить від 25 до 75 % від довжини корпусу корабля. Місце встановлення – скулове скруглення, причому так, щоб кілі не виступали за габарити міделя. Лінія кіля повинна бути погоджена з лініями попутного потоку, обумовленими випробуваннями моделі або комп'ютерним моделюванням.

Конструктивно кілі виконуються у вигляді листа, встановленого на ребро. При висоті кіля більше 400 мм, пластину підкріплюють штабовою або штабобульбовою балкою. При висоті кіля більше 600 мм кіль виконується у вигляді двогранника, всередину якого для жорсткості вварюються ребра.

Вплив бічних кілів на швидкість ходу корабля невеликий. Для швидкохідних кораблів зменшення швидкості на тихій воді не перевершує 2...3 %. На хвилюванні ж це зменшення швидкості ще менше.

Бортові керовані стерна

Бортові керовані рулі є крилами малого подовження, які виступають з обох бортів з обшивки корабля та можуть повертатися на балерах (рис. 5.7). Балери через водонепро-

никні сальники проходять всередину корпусу корабля та обертаються за допомогою спеціального автоматично керованого приводу.

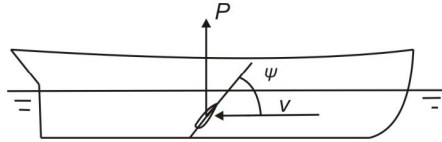


Рисунок 5.7 – Бічні керовані рули

Під час руху корабля зі швидкістю v при відхиленні правого стерна на кут ψ від середнього положення на ньому виникає піднімальна сила P . Якщо на лівому борті корабля симетрично розташоване стерно, відхилене на такий же кут ψ , але в протилежну сторону, то на ньому також повинна розвинути піднімальна сила P , проте спрямована донизу (рис. 5.8). При цьому виникає момент, який можна зробити протилежним по напрямку крену. Частота переключки стерна робиться рівною частоті збурюючій, тобто заспокоювач можна налаштувати. Керування переключкою проводиться автоматично.

Ефективність таких заспокоювачів висока, але вони займають багато місця та дуже коштовні, тому застосовуються на великих пасажирських лайнерах для забезпечення максимального комфорту пасажирів під час хитавиці.

Великий недолік цих заспокоювачів – низька ефективність на малих швидкостях і неможливість роботи без ходу.

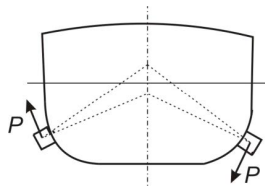


Рисунок 5.8 – Сили, що виникають на бічних стернях

Заспокійливі цистерни

Першими заспокоювачами рідинного типу були площинні цистерни, в яких знаходилася рідина з вільною поверхнею (рис. 5.9). За рахунок вільної поверхні зменшувалася остійність корабля, збільшувався період його вільних коливань, і для корабля, розташованого лагом до хвилі, резонанс зміщався до більш довгих, а отже, і менш крутих хвиль. Крім того, оскільки довгі хвилі на нерегулярному хвилюванні мають меншу повторюваність, ніж короткі, зменшувалася ймовірність резонансного режиму.

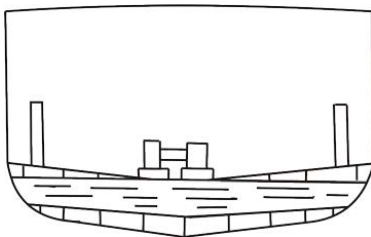


Рисунок 5.9 – Площинні заспокійливі цистерни

Подальшим розвитком рідинних заспокоювачів є пасивні цистерни. Вони є свого роду гідравлічним маятником, що складається із з'єднаних між собою цистерн, розташованих у подвійних бортах корабля.

Розрізняють цистерни першого й другого роду. Цистерни першого роду (закриті) з'єднуються у днищі рідинним, а зверху – повітряним каналами (рис. 5.10). У цистернах другого роду (відкритих) також є повітряний канал, а замість водяного каналу роблять отвори в бортах і рідинне сполучення здійснюється через забортну воду (рис. 5.11). Таким чином, цистерни першого роду можуть бути використані як паливні, а для цистерн другого роду така можливість відсутня.

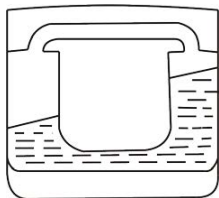


Рисунок 5.10 – Пасивні цистерни першого роду

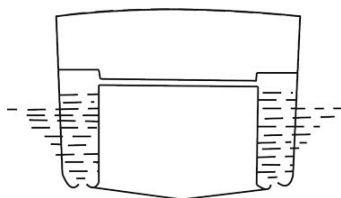


Рисунок 5.11 – Пасивні цистерни другого роду

Стабілізуюча дія пасивних цистерн заснована на принципі так званого вторинного (або подвійного) резонансу. Суть цього принципу полягає у наступному. При резонансі бортової хитавиці змушені коливання корабля відстають по фазі від збурюючої сили на 90° . Якщо період власних коливань рідини в цистернах дорівнює періоду власних коливань корабля – також має місце резонанс (вторинний) і коливання рідини відстають на 90° від коливань корабля. Таким чином, у розглянутому випадку зміщення фаз між коливаннями рідини в цистернах та збурюючої хвилі становить 180° , а у результаті створюється стабілізуючий момент.

У наш час пасивні цистерни застосовують рідко через низьку ефективність на нерегулярному хвилюванні, збільшення амплітуд хитавиці в нерезонансних умовах, зниження вантажопідйомності та вантажомісткості, а також через інші недоліки. Крім того, відкриті цистерни істотно знижують швидкість корабля через те, що частина потужності силової установки витрачається на переміщення баласту.

Оптимізація цистерн може бути досягнута встановленням компресора у повітряному каналі або насоса змінної продуктивності. Компресор може бути встановлений як у відкритих, так і в закритих цистернах, а насос для перекачування рідини із цистерни в цистерну – тільки в закритих.

Активні цистерни використовуються значно ефективніше пасивних. Вони створюють стабілізуючий момент

не тільки при резонансі, але й при будь-якому співвідношенні частот, що відіграє істотну роль в умовах нерегулярного хвилювання. Їх можна використовувати для стабілізації корабля, який має статичний крен, для розгойдування на тихій воді тощо. В той же час внаслідок своєї складності, великої вартості, необхідності затратити потужність для приведення до руху стабілізуючу рідину, високих вимог до системи автоматичного керування активні цистерни на кораблях встановлюються рідко.

Частіше за пасивні цистерни застосовують інший вид заспокоювачів гравітаційного типу – цистерни типу «Флюм» (рис. 5.12).

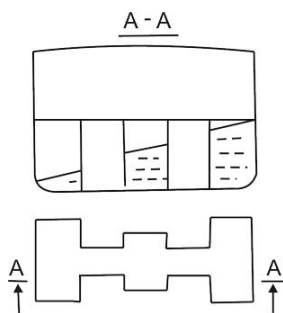


Рисунок 5.12 – Цистерни типу «Флюм»

«Флюм»-система складається із двох бортових цистерн, з'єднаних каналом, висота якого однакова з висотою цистерн. У середній частині канал має розширений відсік. Цистерни та канал заповнюються рідиною так, що в них завжди є вільна поверхня. Систему проєктують таким чином, щоб період вільних коливань стабілізуючої рідини дорівнював періоду вільних коливань корабля при деякому характерному для умов його експлуатації стані навантаження. Зміна рівня наливу рідини на періоді її вільних коливань відбивається неістотно. Таким чином, цистерни типу «Флюм» поєднують

у собі властивості, прийнятні площинним цистернам, які зменшують остійність, і пасивним цистернам закритого типу, стабілізуючий ефект яких заснований на принципі вторинного резонансу. Потік рідини в цих цистернах щонайменше вдвічі різко змінює площу свого перетину, використовуючи раптові звуження та розширення. При цьому потік втрачає частину своєї кінетичної енергії, тобто має місце демпфірування коливань стабілізуючої рідини. Це, з одного боку, послабляє небажані удари рідини у кришки цистерн, а з іншого – зменшує вплив хитавиці при нерезонансних режимах.

Питання для самоконтролю

1. За якими ознаками класифікують заспокоювачі хитавиці?
2. Опишіть принцип дії системи «Флюм».
3. Згадайте із курсу статички корабля залежності впливу вільної поверхні рідини на остійність.
4. Розрахуйте якість крила, якщо його підймальна сила складає 12 кН, а сила опору 17 кН.
5. На наливній річковій баржі водотоннажністю 1500 т є подвійні борти прямокутної форми вище ватерлінії, розміри кожного $10 \times 1,5$ м. Якщо їх заповнити забортною водою і будуть вільні поверхні, то поперечна метацентрична висота складатиме 2,47 м. Яке буде значення поперечної метацентричної висоти, якщо міжбортові цистерни будуть заповнені без вільних поверхонь?
6. Швидкість судна становить 14 вузлів. Визначити небезпечні курсові кути, якщо період бортової хитавиці 15 секунд. Висоту хвилі прийняти 5,4 м.

6 ПРИКЛАДНІ РОЗРАХУНКИ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ

6.1 Експериментальні методи вивчення хитавиці

6.1.1 Задачі експериментального вивчення хитавиці. Види експериментів

Основними задачами експериментального вивчення хитавиці є:

- 1) підтвердження нових якісних закономірностей процесу хитавиці корабля на хвилюванні, отриманих теоретичним шляхом;
- 2) визначення характеристик хитавиці корабля (періоду хитавиці, коефіцієнтів демпфірування, приєднаних мас);
- 3) повноцінна оцінка морехідності корабля у штормових умовах плавання на реальному морському хвилюванні різної бальності при різних варіантах вагового навантаження;
- 4) дослідження дії спеціальних суднових пристроїв для заспокоєння хитавиці;
- 5) серійні випробування моделей для дослідження впливу головних розмірювань та обводів корабля на його морехідність та характеристики хитавиці.

Для вирішення зазначених вище задач морехідності суден проводяться натурні, модельні та напівнатурні випробування хитавиці.

Переваги натурних випробувань очевидні: вони дають можливість досліджувати хитавицю в природніх зовнішніх умовах на реальному об'єкті з урахуванням усіх особливо-

стей форми корпусу, надбудов та виступаючих частин. Однак труднощі організації та проведення натурних випробувань настільки ж очевидні: виведення корабля повністю або частково з експлуатації, що призведе до економічних витрат, відомий ризик при маневруванні під час експерименту в штормову погоду, труднощі, а іноді й неможливість потрапляння, у необхідні погодні умови. У процесі натурних випробувань практично неможливо вирішувати завдання удосконалення морехідних якостей та плавності хитавиці шляхом зміни таких елементів корабля, як форма шпангоутів і ватерліній, коефіцієнти повноти, співвідношення головних розмірювань. Незважаючи на більшу цінність матеріалів, отриманих у результаті натурних випробувань, основним засобом експериментального вивчення хитавиці є модельні випробування [26].

Напівнатурні випробування відрізняються наступним: значно більші моделі кораблів випробовуються на полігонах у реальних морських умовах. Моделі з розміщеною на них апаратурою управляються або оператором із використанням радіотехнічних засобів. У той же час організація таких випробувань досить складна, до того ж необхідні відповідні погодні умови.

Моделльні експерименти зазвичай проводять в опитових басейнах, призначених для дослідження задач морехідності. Для проведення випробувань із моделями на хвилюванні такі басейни повинні бути обладнані хвилепродукторами та хвилезаспокоювачами. Для створення хвиль у басейні застосовуються три типи хвилепродукторів: плунжерний, пластинчастий та пневматичний.

Найбільше поширення одержали хвилепродуктори *плунжерного* типу (рис. 6.1), у яких частково занурене тіло (плунжер), створюючи зворотно-поступальні вертикальні переміщення, викликає хвилеутворення в басейні.

Регулюючи амплітуду та частоту коливань плунжера, можна одержати систему хвиль різної довжини, висоти та частоти. Основним недоліком плунжерних хвилепродукторів є велика маса плунжера.

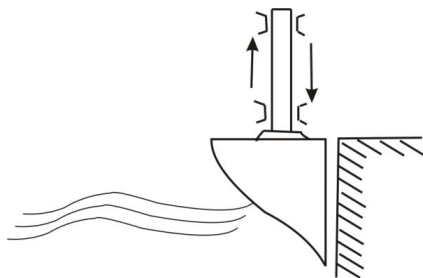


Рисунок 6.1 – Плунжерний хвилепродуктор

Пластинчасті хвилепродуктори (рис. 6.2) являють собою встановлену вертикально пластину, яка коливається відносно горизонтальної осі. Недоліком пластинчастих хвилепродукторів є неможливість забезпечення правильного профілю хвилі.

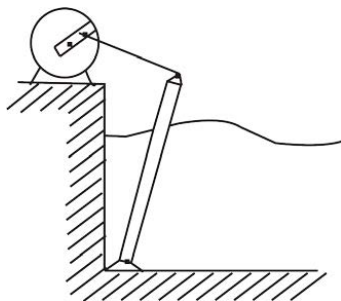


Рисунок 6.2 – Пластинчастий хвилепродуктор

Принцип дії *пневматичних* хвилепродукторів (рис. 6.3) полягає у генерації хвиль за рахунок періодично мінливого тиску повітря у соплі хвилепродуктора. Джерелом повітря служить центробіжний насос.

Пневматичні хвилепродуктори у порівнянні з іншими мають наступні переваги:

- 1) високу точність і регулярність утворення хвиль;
- 2) відсутність деталей, які рухаються або працюють у воді.

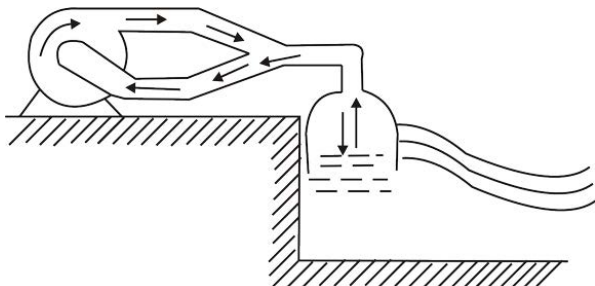


Рисунок 6.3 – Пневматичний хвилепродуктор

Недоліком пневматичних хвилепродукторів є відносно низький ККД.

Як хвилезаспокоювачі в опитових басейнах використовуються сітки та пластини із рейками, які встановлено навпроти хвилепродукторів на протилежних сторонах басейну.

Модельні випробування хитавиці в басейні дозволяють оцінити її характеристики при різних осадках, водотоннажностях, положеннях центру ваги по висоті та довжині корабля в досить широкому діапазоні висот і довжин хвиль. Крім того, за результатами модельних випробувань за короткий час можна змінити форму корпусу моделі, наприклад, розвал шпангоутів у надводній частині або повноту носової кінцевості, які впливають на характеристики хитавиці. Істотні обмеження на модельний експеримент накладають розміри моделей, які тим менше, чим менше басейн. Як правило, довжина моделей при випробуваннях на хитавицю коливається від півтора до п'яти метрів. Проте навіть при випробуваннях значно більших моделей (довжина 4...5 м)

результати експериментів, пов'язаних із впливом в'язкісних та відривних ефектів можуть вийти некоректними. Цим обумовлене існування масштабного ефекту.

6.1.2 Критерії подібності. вимоги до проведення експерименту

Для забезпечення можливості перерахування отриманих даних з моделі на натуру необхідно виконати три види подібності: геометричну, кінематичну та динамічну.

Геометрична подібність визначає пропорційність лінійних розмірів моделі та натури, тобто модель повинна бути виконана строго в певному масштабі відповідно до натури:

$$\frac{L_M}{L_H} = \frac{B_M}{B_H} = \frac{T_M}{T_H} = K. \quad (6.1)$$

Кінематична подібність характеризується пропорційністю значень швидкостей у східних точках потоку.

Динамічна подібність передбачає пропорційність сил різної фізичної природи моделі та натури. Для забезпечення повної динамічної подібності необхідно виконати одночасну рівність наступних критеріїв для моделі та натури:

– число Струхаля $St = \frac{\tau V}{L};$

– число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}};$

– число Ейлера $Eu = \frac{2p}{\rho V^2};$

– число Рейнольдса $Re = \frac{VL}{\nu};$

– число Вебера $We = \frac{\sigma_{II}}{\rho V^2 L}.$

У цих виразах L – характерна довжина; τ – характерний час; V – характерна швидкість; p – тиск у рідині; g – прискорення вільного падіння; ρ – щільність рідини; σ_{II} – коефіцієнт сил поверхневого натягу.

Число Струхала St пов'язане з несталим або періодичним рухом рідини, тому при моделюванні хитавиці воно повинне обов'язково враховуватися. Умова моделювання за Струхалем має вигляд

$$\frac{V_M \tau_M}{L_M} = \frac{V_H \tau_H}{L_H}, \quad (6.2)$$

де за характерний період часу звичайно представляють період власних коливань на тихій воді.

Число Ейлера Eu характеризує сили гідродинамічного тиску. Цей критерій подібності має самостійне значення тільки при моделюванні кавітації. В процесі хитавиці кавітація може виникнути лише в досить окремому випадку перекладки бортових керованих стерен. Для інших випадків моделювання за цим критерієм не виконують.

Найважливішим динамічним критерієм подібності в модельних експериментах по хитавиці є число Фруда, яке характеризує відношення інерційних сил у рідині до сили ваги. Число Fr визначає, у першу чергу, моделювання процесу хвилеутворення під час руху корабля по поверхні води. Рівність чисел Фруда моделі та натури забезпечує пропорційність хвильових гідродинамічних сил. Для цього необхідно виконання рівності

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_H}{\sqrt{gL_H}}. \quad (6.3)$$

Звідси швидкість моделі складатиме

$$V_M = V_H \sqrt{\frac{L_M}{L_H}} = V_H \sqrt{K}. \quad (6.4)$$

Використовуючи число St , отримаємо період хвилі або період хитавиці для моделі

$$T_M = T_H \frac{V_H L_M}{V_M L_H} = T_H \frac{V_H K}{V_H \sqrt{K}} = T_H \sqrt{K}, \quad (6.5)$$

тобто при дотриманні умов подібності одночасно за St та Fr період хитавиці моделі, заміряний у процесі випробувань, повинен бути менше періоду хитавиці натурального корабля у кількості разів, яка дорівнює кореню квадратному із масштабного коефіцієнта [14].

Моделювання за числом Рейнольдса характеризує відношення сил інерції до сил в'язкості. При моделюванні хитавиці це, насамперед, сили тертя води із зовнішньою обшивкою корпусу та опір форми при відривному обтіканні та вихороутворенні (наприклад, на скулових кілях). Рівність чисел Рейнольдса моделі та натури передбачає пропорційність гідродинамічних сил, обумовлених в'язкістю рідини для моделі та натури:

$$\frac{V_M L_M}{\nu_M} = \frac{V_H L_H}{\nu_H}. \quad (6.6)$$

При випробуваннях у воді кінематичні коефіцієнти в'язкості моделі та натури приймаються рівними $\nu_M = \nu_H$. Тоді

$$V_M = V_H \frac{L_H}{L_M} = \frac{V_H}{K}. \quad (6.7)$$

В умовах модельних випробувань хитавиці останнє співвідношення виконати неможливо, тому подібність по числу Рейнольдса не виконується, а сили в'язкісної природи не моделюються. Проте відомо, що під час руху тіл у рідині існує так звана зона автомодельності, в якій безрозмірні коефіцієнти гідродинамічних сил і моментів практично не залежать від числа Рейнольдса. Численними методами встановлено, що автомодельність при випробуваннях хитавиці

забезпечується при $Re > 106$, принаймні вона повинна бути не менше $3 \cdot 10^5$. Щоб досягти таких Re при бортовій хитавиці моделей, необхідно значно збільшувати розміри моделей.

Число Вебера We характеризує відношення сил поверхневого натягу до сил інерції рідини. Рівність чисел Вебера моделі та натури приводить до умови

$$\frac{\sigma_{\text{пм}}}{\rho_{\text{м}} V_{\text{м}}^2 L_{\text{м}}} = \frac{\sigma_{\text{пн}}}{\rho_{\text{н}} V_{\text{н}}^2 L_{\text{н}}} . \quad (6.8)$$

Вважаючи, що $\sigma_{\text{пм}} = \sigma_{\text{пн}}$ та $\rho_{\text{м}} = \rho_{\text{н}}$, отримаємо

$$V_{\text{м}} = V_{\text{н}} \sqrt{\frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}}} = \frac{V_{\text{н}}}{\sqrt{K}} . \quad (6.9)$$

Цю умову в процесі модельних випробувань на хитавицю виконати також неможливо. У сумарному гідродинамічному моменті, який діє на натурний корабель, роль моменту сил поверхневого натягу завжди незначна, у той час як для моделей вона може бути значною (від 40 % для малої моделі та до 16 % для відносно великої). Для зменшення похибки при випробуваннях на бортову хитавицю ширину моделей приймати не менше 0,5 метрів.

Таким чином, при моделюванні процесу хитавиці необхідно забезпечити подібність за критеріями Струхаля та Фруда, забезпечити $Re \geq 3 \cdot 10^5$ та використовувати моделі, ширина яких $B > 0,5$ м. При модельних випробуваннях на поздовжню хитавицю останні два обмеження не потрібні, тому що вплив в'язкісних сил та сил поверхневого натягу незначний. Проте довжину моделей слід прийняти не менше 1,5 метрів.

6.1.3 Експериментальні методи дослідження хитавиці

При модельних випробуваннях хитавиці корабля застосовуються два методи – метод вільних коливань та метод змушених коливань.

Метод вільних коливань використовується при вивченні хитавиці на тихій воді з метою визначення періоду вільних загасаючих бортових коливань, коефіцієнта демпфірування бортової хитавиці та приєднаного моменту інерції. Для забезпечення подібності моделі та натури модель попередньо підлягає таруванню.

Тарування – це визначення параметрів моделі (ваги, положення центру ваги і т. д.) і приведення їх до значень, які забезпечують подібність моделі та натури. Тарування існує двох видів – статичне та динамічне.

Статичне тарування моделі полягає у встановленні ваги та положення центру її ваги. Вага моделі визначається зважуванням. Положення центру ваги може бути визначене на плаву за допомогою «дослідів кренування» або в процесі динамічного тарування.

Динамічне тарування виконується для визначення моменту інерції. Модель розгойдується у повітрі на спеціальних підвісах і вимірюється період вільних коливань. Потім, використовуючи відому формулу для періоду маятника та співвідношення між центральним та нецентральним (переносним) моментами інерції мас, знаходиться величина

$$J_x = Dd \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 - \frac{D}{g} d^2, \quad (6.10)$$

де

J_x – момент інерції маси моделі відносно поздовжньої осі Gx ;

D – вагова водотоннажність;

$d = z_h - z_g$;

z_h – відстань осі центру коливань від основної площини;

z_g – відстань центру ваги моделі від основної площини.

Після тарування виконується безпосередньо випробування згідно з методом вільних коливань. Для визначення періоду хитавиці, коефіцієнта демпфірування та приєднано-

го моменту інерції спущена на воду модель нахилиється експериментатором на $15 \dots 25^\circ$, потім відпускається та починає робити вільні загасаючі коливання, які записуються за допомогою гірокренографа. Типовий запис для моделі транспортного корабля зображений на рис. 6.10. При подальшій обробці осцилограми визначаються всі необхідні величини.

При великому демпфіруванні вільні коливання швидко загасають, а їх обробка супроводжується великими похибками. Тому при моделюванні вертикальної та кильової хитавиці, а також бортової хитавиці моделей, які мають розвинені виступаючі частини, необхідно скористатися експериментальним методом змушених коливань. Суть даного методу полягає в наступному: на моделі встановлюють пристрій, який розгойдує, створює момент, який змінюється за гармонійними законами:

$$M = M_0 \sin \omega t. \quad (6.11)$$

Тут і далі ω – частота збурювання.

Під час випробувань синхронно реєструються збурюючий момент, а хитавиця моделі дозволяє при будь-якій частоті визначити коефіцієнти опору та приєднаної маси. Типовий вигляд осцилограми змущеної хитавиці моделі на тихій воді, яку розгойдує пристрій, зображено на рис. 6.4.

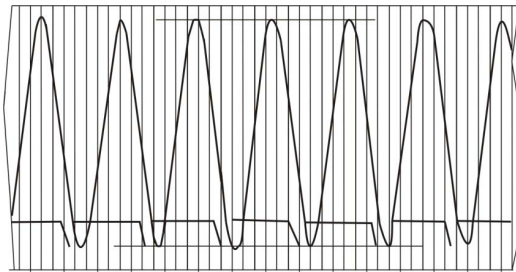


Рисунок 6.4 – Осцилограма змущеної хитавиці моделі на тихій воді із розгойдуючим пристроєм

У наш час застосовуються наступні типи пристроїв для розгойдування: гіроскопічні та обертові тверді вантажі.

Прецесійне обертання гіророзгойдувача приводить до виникнення гіроскопічного моменту. Збурюючий момент дорівнює гіроскопічному моменту (який кренить) і визначається наступною наближеною залежністю:

$$M = Jn_0\omega \sin\beta \sin\omega t, \quad (6.12)$$

де

J – аксіальний момент інерції ротора;

β – настановний кут;

n_0 – власна частота хитамиці моделі.

Гіророзгойдувачам необхідна стабілізація напруги струму через те, що навіть незначні його коливання приводять до помітних змін амплітуди моменту, який кренить. Останнім часом ці розгойдувачі не застосовуються.

Механічна качалка з обертовими вантажами (рис. 6.5) на режимах більших частот працює хитливо, що значно обмежує сферу застосування цього способу розгойдування.

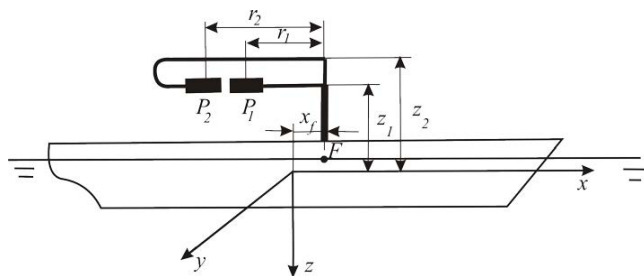


Рисунок 6.5 – Механічна качалка з обертовими вантажами

Метод змущених коливань застосовується не тільки при випробуваннях на тихій воді, але й на хвилюванні. У цьому випадку пристроєм, який розгойдує, служить саме регулярне хвилювання, створене хвилепродуктором. Основною ме-

тою таких випробувань є визначення амплітудно-частотних характеристик різних видів хитавиці [27, 29].

Побудова амплітудного графіка є порівняно простим, але трудомістким експериментом. Модель багаторазово випробовується при різних параметрах хвилювання. Частоти хвилювання слід змінювати з таким розрахунком, щоб охопити під час випробування зону резонансної хитавиці моделі.

Під час випробувань реєструються параметри досліджуваних видів хитавиці та створюваних хвилепродуктом хвиль заданої частоти. Зразок запису хитавиці моделі на хвилюванні представлений на рис. 6.6. У результаті подальшої її обробки будують відповідну амплітудно-частотну характеристику (рис. 6.7).

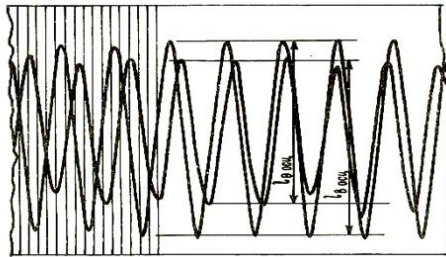


Рисунок 6.6 – Осцилограма хитавиці моделі та характеристик хвилювання

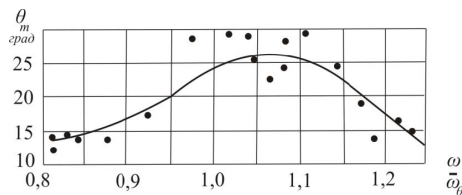


Рисунок 6.7 – Амплітудно-частотна характеристика моделі корабля на регулярному хвилюванні

6.2 Визначення характеристик бортової хитавиці корабля при обробці записів вільних загасаючих коливань

У результаті дослідження бортової хитавиці моделей кораблів на тихій воді методом вільних загасаючих коливань можна визначити період і частоту власних коливань T_0 і n_0 , безрозмірний коефіцієнт затухання $2\bar{V}_0$ і коефіцієнт приєднаної маси $k_0 = \frac{\lambda_{44}}{J_x}$.

Перед обробкою осцилограми вільних загасаючих коливань необхідно визначити тарувальний (градуювальний) коефіцієнт K_0 , що встановлює залежність між кутами нахилу і їх розміром у міліметрах на стрічці реєструючого осцилографа. Визначення коефіцієнту K_0 проводиться на підставі тарувального графіка, побудованого за характерним тарувальним записом (рис. 6.8).

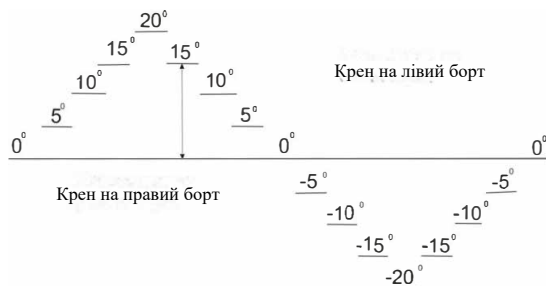


Рисунок 6.8 – Запис тарування гіровертикалі

Для побудови тарувального графіка необхідно на записі виміряти відхилення $l_{\text{осц.}}$ у міліметрах від нульової лінії ($\theta = 0$) при відповідних значеннях кута крену θ . Потім за отриманими значеннями треба побудувати залежність $l_{\text{осц.}} = f(\theta)$. Одержувана залежність завжди близька до лінійної, тому її можна апроксимувати прямою лінією, що прохо-

дить через початок координат (рис. 6.9). Рівняння цієї прямої має вигляд:

$$\theta = K_{\theta} \cdot l_{\text{осц}} . \quad (6.13)$$

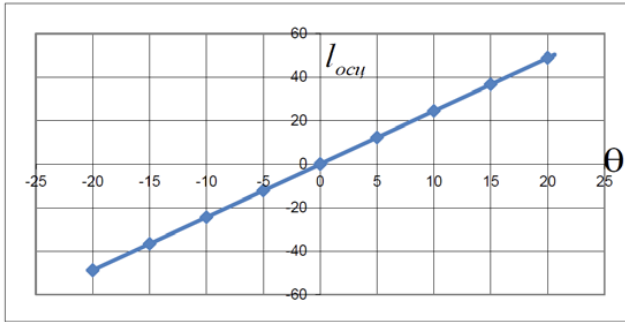


Рис. 6.9 – Визначення тарувального коефіцієнта K_{θ}

Щоб розрахувати K_{θ} , треба при фіксованому значенні θ на графіку виміряти відповідне значення $l_{\text{осц}}$ і підібрати відношення

$$K_{\theta} = \frac{\theta}{l_{\text{осц}}} . \quad (6.14)$$

У наведеному на рис. 6.9 прикладі при $\theta = 200$ $l_{\text{осц}} = 48,8$ мм. Тоді $K_{\theta} = 0,41$ град / мм.

Для визначення періоду T_{θ} за осцилограмою виконують наступне:

- 1) ретельно проводять огинаючі криві загасаючих коливань;
- 2) нумерують через півперіоди всі амплітудні значення коливань, крім початкового (рис. 6.10);
- 3) виділяють n повних коливань і за допомогою вертикальних ліній, що дають відсічення часу (тонкі через 0,2 с, жирні – через 2 с) вимірюють час Tn цих коливань (рис. 6.10). У розглянутому прикладі кількість повних коливань рівна 9;

4) визначають власний період бортової хитавиці й власну частоту як

$$T_{\theta} = \frac{T_n}{n}; \quad (6.15)$$

$$n_{\theta} = \frac{2\pi}{T_{\theta}}. \quad (6.16)$$

Для визначення безрозмірного коефіцієнта демпфірування $2\bar{v}_{\theta}$ може бути використана одна з наступних формул:

– формула С.Н. Благовещенського

$$\bar{v} = -\frac{\Delta\theta}{\pi \theta_{\text{ср}}}, \quad (6.17)$$

де

$\Delta\theta$ – різниця двох сусідніх амплітуд;

$\theta_{\text{ср}}$ – середнє арифметичне цих амплітуд;

– логарифмічна формула

$$2\bar{v}_{\theta} = \frac{2}{\pi} \ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+1}} = \frac{2}{\pi} (\ln \theta_i - \ln \theta_{i+1}) = \frac{2}{\pi} \Delta \ln. \quad (6.18)$$

Розрахунки за формулою (6.17) проводяться в табличній формі (табл. 6.1) у наступній послідовності:

1) на кожному розмаху, починаючи з першого, знімаються в мм значення розмаху $l_{\text{юсц}}$ як відстань по вертикалі між огинаючими (рис. 6.10) і заносяться в II стовпець таблиці;

2) обчислюються q_i , $\Delta\theta$ і $\theta_{\text{ср}}$:

$$\theta_i = \frac{K_{\theta}}{2} \cdot l_{\text{юсц}}; \quad (6.19)$$

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_{i+1}; \quad (6.20)$$

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}; \quad (6.21)$$

3) за результатами обчислень $\Delta\theta$ будується графік $\Delta\theta = f(N)$ (N – номер розмаху). Через деякі погрішності, що мають місце при проведенні експерименту й знятті $l_{\text{юсп}}$, значення $\Delta\theta$ не лягають на плавну криву, у зв'язку з чим необхідно провести графічну апроксимацію залежності $\Delta\theta = f(N)$ за допомогою усередненої плавної кривої. При цьому усереднена крива повинна убувати при збільшенні N (рис. 6.11); в V стовпець заносяться значення $\Delta\theta_{\text{випр}}$, зняті з апроксимуючої кривої для кожного розмаху (рис. 6.11);

4) в VI стовпці обчислюються значення безрозмірного коефіцієнта демпфування.

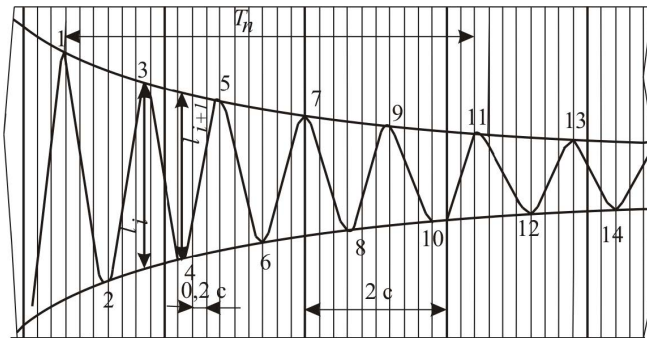


Рисунок 6.10 – Осцилограма вільних загасаючих коливань

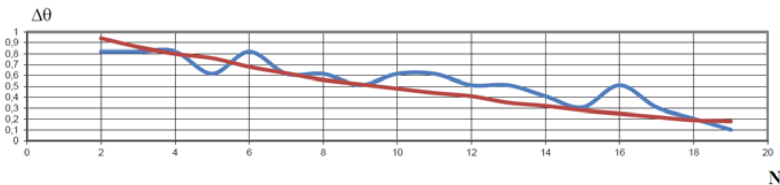


Рисунок 6.11– Апроксимація залежності $\Delta\theta = f(N)$

Таблиця 6.1 – Розрахунки безрозмірного коефіцієнта загасання за формулою (6.17)

$l_{\text{осц}}$	θ_i	$\Delta\theta$	$\Delta\theta_{\text{випр}}$	$\theta_{\text{ср}}$	$2\bar{v}_\theta$
76	15,58	—	—	—	—
72	14,76	0,82	0,94	15,17	0,0394
68	13,94	0,82	0,86	14,35	0,038
64	13,12	0,82	0,8	13,53	0,0376
61	12,505	0,615	0,76	12,8125	0,0377
57	11,685	0,82	0,68	12,095	0,0357
54	11,07	0,615	0,62	11,3775	0,03469
51	10,455	0,615	0,56	10,7625	0,03312
48,5	9,9425	0,5125	0,52	10,198	0,03246
45,5	9,3275	0,615	0,48	9,635	0,0317
42,5	8,7125	0,615	0,44	9,02	0,03105
40	8,2	0,5125	0,41	8,456	0,0308
37,5	7,6875	0,5125	0,35	7,944	0,028
35,5	7,2775	0,41	0,32	7,4825	0,0272
34	6,97	0,3075	0,28	7,124	0,025
31,5	6,4575	0,5125	0,25	6,713	0,0237
30	6,15	0,3075	0,22	6,303	0,022
29	5,945	0,205	0,19	6,047	0,02
28,5	5,8425	0,1025	0,18	5,89	0,0194

Розрахунки за коефіцієнтами демпфірування по формулі (6.18) проводяться в такий спосіб (табл. 6.2):

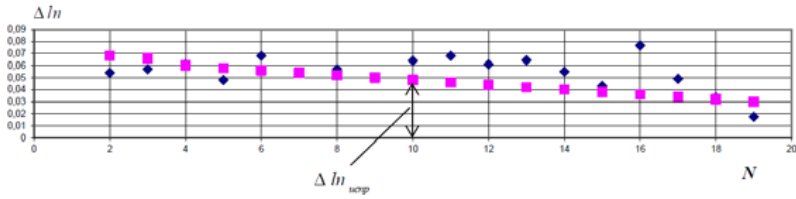
1) обчислюють θ_i по формулі (6.19), $\ln \theta_i$ і $\Delta \ln$:

$$\Delta \ln = (\ln \theta_i - \ln \theta_{i-1}) ; \quad (6.23)$$

2) будують графічну залежність $\Delta \ln = f(N)$ і проводять апроксимуючу криву (рис. 6.12);

3) в VI стовпець підставляють значення $\Delta \ln_{\text{випр}}$, зняті з апроксимуючої кривої (рис. 6.12);

4) обчислюють значення безрозмірного коефіцієнта демпфірування.

Рисунок 6.12 – Апроксимація залежності $\Delta \ln = f(N)$ **Таблиця 6.2 – Розрахунки безрозмірного коефіцієнта загасання за формулою (6.18)**

$l_{\text{осц}}$	θ_i	$\ln \theta_i$	$\Delta \ln$	$\Delta \ln_{\text{випр}}$	$2\bar{v}_0$	$\theta_{\text{ср}}$
76	15,58	2,746	—	—	—	—
72	14,76	2,692	0,054	0,068	0,0433	15,17
68	13,94	2,635	0,057	0,066	0,042	14,35
64	13,12	2,574	0,061	0,06	0,038	13,53
61	12,505	2,526	0,048	0,058	0,0369	12,8125
57	11,685	2,458	0,068	0,056	0,0356	12,095
54	11,07	2,404	0,054	0,054	0,0343	11,3775
51	10,455	2,347	0,057	0,052	0,033	10,7625
48,5	9,9425	2,297	0,05	0,05	0,0318	10,198
45,5	9,3275	2,233	0,064	0,048	0,0305	9,635
42,5	8,7125	2,165	0,068	0,046	0,0292	9,02
40	8,2	2,104	0,061	0,044	0,028	8,456
37,5	7,6875	2,0396	0,0644	0,042	0,0267	7,944
35,5	7,2775	1,9847	0,0549	0,04	0,0254	7,4825
34	6,97	1,9416	0,0431	0,038	0,024	7,124
31,5	6,4575	1,865	0,0766	0,036	0,0229	6,713
30	6,15	1,816	0,049	0,034	0,0216	6,303
29	5,945	1,7825	0,0335	0,032	0,0203	6,047
28,5	5,8425	1,765	0,0175	0,03	0,019	5,89

Результати обчислення безрозмірного коефіцієнта демпфірування по кожній з формул представляються графічно у вигляді залежності $2\bar{v}_0 = f(\theta_{\text{ср}})$ (рис. 6.13). Звичайно результати обробки за обома формулами дуже близькі.

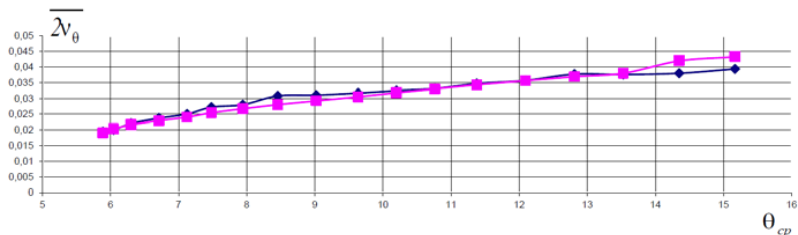


Рисунок 6.13 – Значення коефіцієнта затухання, отримані за формулами (6.17) і (6.18)

У практичних розрахунках хитавиці іноді потрібно знати коефіцієнт квадратичного опору w_θ . Для його визначення використовується формула

$$w_\theta = \frac{3\pi}{8} \frac{2\bar{v}_\theta}{\theta_{cp}}, \quad (6.25)$$

отримана з умови рівності робіт лінійного й квадратичного моментів опору хитавиці за чверть періоду.

Для обчислення коефіцієнта приєднаної маси використовується формула

$$k_\theta = \frac{\lambda_{44}}{J_x} = \left(\frac{T_\theta}{2\pi} \right)^2 \frac{Dh_0}{J_x} - 1. \quad (6.26)$$

Нагадуємо, що

J_x – момент інерції маси корпусу;

D – вагова водотоннажність моделі;

h_0 – початкова метацентрична висота моделі;

T_θ – замірний за осцилограмою період.

6.3 Розрахунки бортової хитавиці корабля, розташованого лагом до хвилювання

6.3.1 Розрахунки бортової хитавиці корабля на регулярному хвилюванні

Скорочене рівняння бортової хитавиці корабля кінцевих розмірів на регулярному хвилюванні, що одержало широке розповсюдження в інженерних розрахунках, відповідно до (3.40') має вигляд:

$$(J_x + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + v_{44} \dot{\theta} + Dh_0 \theta = Dh_0 \kappa_\theta \alpha_0 \sin \omega t ,$$

де

α_0 – кут хвильового схилу;

κ_θ – поправочний коефіцієнт, що враховує кінцівку розмірів корабля.

Розділимо праву й ліву частини його на коефіцієнти при другій похідній. Тоді отримаємо

$$\ddot{\theta} + 2v_\theta \dot{\theta} + n_\theta^2 \theta = \kappa_\theta n_\theta^2 \alpha_0 \sin \omega t . \quad (6.27)$$

Тут відповідно до (3.11) і (3.12) позначено

$$2v_\theta = \frac{v_{44}}{(J_x + \lambda_{44})} ; \quad (6.28)$$

$$n_\theta = \sqrt{\frac{Dh_0}{(J_x + \lambda_{44})}} . \quad (6.29)$$

Розв'язок рівняння (6.27) має вигляд

$$\theta = \theta_m \sin(\omega t - \delta_\theta) , \quad (6.30)$$

де амплітуда бортової хитавиці θ_m й фаза δ_θ визначаються з наступних виразів:

$$\theta_m = \frac{\kappa_\theta \alpha_0 n_\theta^2}{\sqrt{(n_\theta^2 - \omega^2)^2 + 4v_\theta^2 \omega^2}} ; \quad (6.31)$$

$$\delta_{\theta} = \arctg \left(\frac{2v_{\theta}\omega}{n_{\theta}^2 - \omega^2} \right). \quad (6.32)$$

Коефіцієнт динамічності бортової хитавиці являє собою відношення амплітуди хитавиці до кута хвильового схилу й визначається як

$$\frac{\theta_m}{\alpha_0} = \frac{\kappa_{\theta} n_{\theta}^2}{\sqrt{(n_{\theta}^2 - \omega^2)^2 + 4v_{\theta}^2 \omega^2}}. \quad (6.33)$$

Таким чином, розрахунки хитавиці на регулярному хвилюванні зводяться до розрахунків амплітуд і фаз по формулах (6.32), (6.33) у широкому діапазоні зміни частот хвилювання ω і побудови за отриманим даними амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик.

Попередньо необхідно визначити всі вхідні у вирази (6.32) і (6.33) величини.

Визначення власної частоти бортової хитавиці n_{θ} проводиться по формулі (6.30). При цьому $D = \rho g V$; $V = \delta L B T$ – об’ємна водотоннажність корабля до КВЛ.

Момент інерції маси корабля щодо поздовжньої осі J_x розраховується за однією з наближених формул:

1) за формулою Шиманського

$$J_x = \frac{D}{g} \left(\frac{B^2 \alpha^2}{11,4\delta} + \frac{H^2}{12} \right), \quad (6.34)$$

де α – коефіцієнт повноти площі розрахункової ватерлінії; δ – коефіцієнт загальної повноти; H – висота борту. Вони визначаються як

$$\alpha = \frac{S_{КВЛ}}{LB}; \quad \delta = \frac{V_{КВЛ}}{LBT}. \quad (6.35)$$

Формула Шиманського отримана в припущенні про те, що корпус корабля являє суцільний параболічний циліндр;

2) за залежністю Дуайєра

$$J_x = \frac{D}{12g} (B^2 + 4z_g^2), \quad (6.36)$$

де z_g – апліката центру ваги корабля.

Формула (6.36) отримана в припущенні, що корпус корабля являє собою суцільний прямокутний паралелепіпед шириною B і висотою $2z_g$.

Визначення моменту інерції приєднаної маси λ_{44} та коефіцієнту затухання $2\nu_0$ проводиться за допомогою номограм або наближених емпіричних формул, що враховують вплив в'язкісних ефектів на бортову хитавицю. Номограми для їхнього визначення наведені на рис. 6.14 – 6.17.

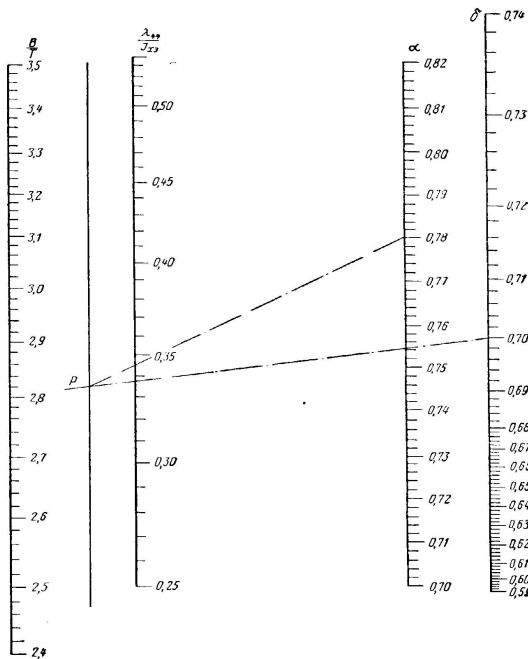


Рисунок 6.14 – Номограма для визначення коефіцієнта приєднаного моменту інерції транспортних суден [8]

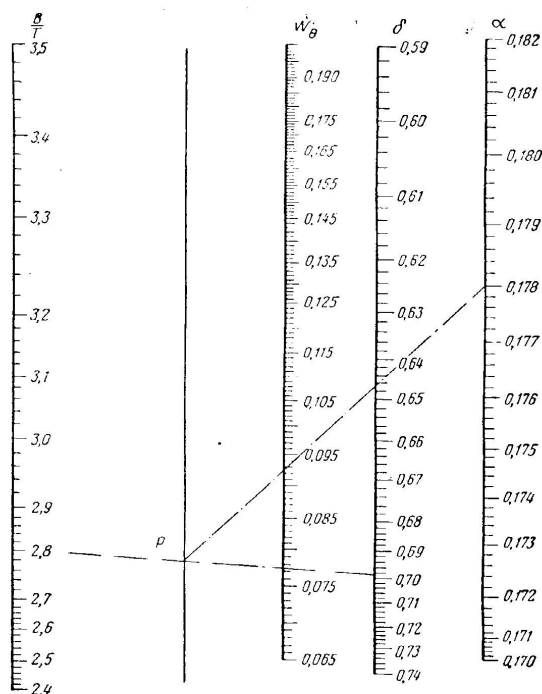


Рисунок 6.15 – Номограма для визначення коефіцієнта демпфірування транспортних суден [8]

Визначення λ_{44} за номограмами проводиться в наступному порядку:

1) відклавши по відповідних осях задані значення B/T і δ , з'єднуємо отримані точки прямою лінією і на допоміжній осі знаходимо точку P ;

2) з'єднуючи цю точку із точкою на осі α , відповідною до заданого значення, визначаємо коефіцієнт $\frac{\lambda_{44}}{J_{VE}}$;

3) величину λ_{44} обчислюємо як

$$\lambda_{44} = \frac{\lambda_{44}}{J_{VE}} J_{VE}, \quad (6.37)$$

де

$$J_{VE} = \frac{\rho V}{12} (B^2 + 4T^2) \frac{\pi}{10\delta} - \quad (6.38)$$

момент інерції маси води в об'ємі еквівалентного еліпсоїда (в еквівалентного еліпсоїда довжина дорівнює довжині корабля, ширина – ширині корабля, товщина – подвоєній осадці корабля, водотоннажність – водотоннажності корабля).

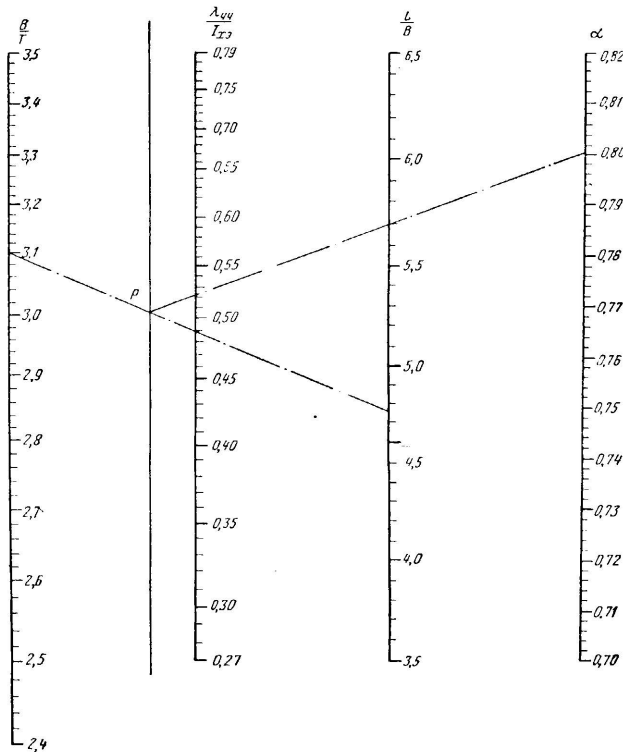


Рисунок 6.16 – Номограма для визначення приєднаного моменту інерції промислових і буксирних суден [8]

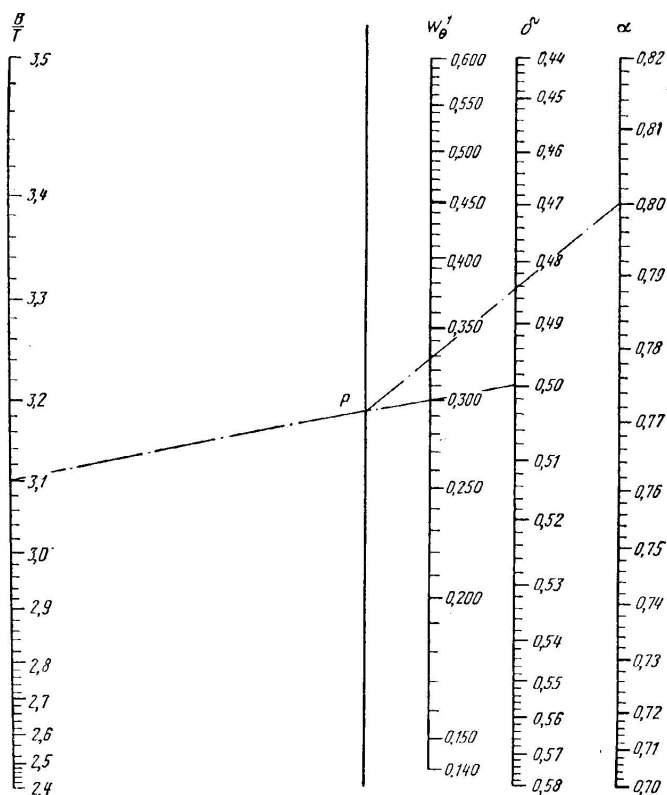


Рисунок 6.17 – Номограма для визначення коефіцієнта демпфірування промислових і буксирних суден [8]

Коефіцієнт демпфірування $2\nu_0$ за допомогою номограм визначається в такий спосіб:

1) відклавши по відповідних осях задані значення B/T і δ , з'єднуємо отримані точки прямою лінією й на допоміжній осі знаходимо точку P ;

2) з'єднуючи цю точку з точкою на осі α , відповідною до заданого значення, визначаємо безрозмірний коефіцієнт квадратичного опору w'_0 ;

3) коефіцієнт $2\nu_0$ обчислюємо за формулою

$$2v_{\theta} = 0,3 \cdot n_{\theta} \cdot \sqrt{w}, \quad (6.40)$$

де

$$w = w'_{\theta} \sqrt[4]{\frac{\rho_x}{h_o}}; \quad (6.41)$$

$$\rho_x = \sqrt{\frac{J_x + \lambda_{44}}{\rho V}} - \quad (6.42)$$

наведений радіус інерції маси корпусу корабля (з урахуванням приєднаного моменту інерції).

У випадку, якщо один з параметрів корабля δ , α або B/T перебуває поза діапазоном, зазначеним на номограмах, для розрахунків гідродинамічних характеристик бортової хитавиці можна скористатися емпіричними формулами Авдєєва-Анфімова, отриманими шляхом обробки даних великої кількості модельних випробувань морських суден і суден внутрішнього плавання в широкому діапазоні відношень ширини до осадки:

$$\lambda_{44} = \frac{J_x}{0,28 + \frac{1,8\rho'_x}{\alpha B \left(1 + \frac{1}{6} \frac{B}{T}\right)}} - J_x; \quad \rho'_x = \sqrt{\frac{J_x}{\rho V}}; \quad (6.43)$$

$$w = 0,24 + 1,42 \frac{h_0}{B} \left(\frac{\alpha B \left(1 + \frac{1}{6} \frac{B}{T}\right)}{4\rho_x} \right)^2; \quad \rho_x = \sqrt{\frac{(J_x + \lambda_{44})}{\rho V}}.$$

Поправочний коефіцієнт κ_{θ} , що входить у вираз (6.33), визначається за залежністю, отриманою в результаті апроксимації більш точних розв'язків:

$$\kappa_{\theta} = \exp\left(-4,2(\bar{R} \cdot \omega)^2\right). \quad (6.44)$$

Тут $\chi = \frac{\delta}{\alpha}$ – коефіцієнт вертикальної повноти корабля;
 r – поперечний метацентричний радіус.

При відсутності розрахунків статики корабля r може бути визначений за наближеною формулою І.А. Яковлева:

$$r = \frac{\alpha + \alpha^3}{24\delta} \frac{B^2}{T}. \quad (6.46)$$

Характерна залежність коефіцієнта κ_θ від частоти хвилювання наведена на рис. 6.18.

Після визначення перерахованих величин розрахунки за формулами (6.32) і (6.33) проводяться в табличній формі (табл. 6.3). За отриманими даними будуються амплітудно-частотна (рис. 6.19) і фазово-частотна (рис. 6.20) характеристики бортової хитавиці.

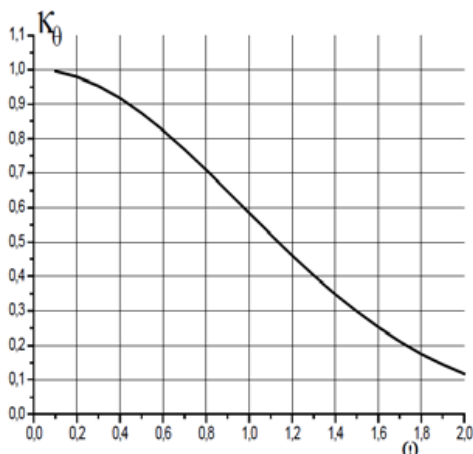


Рисунок 6.18 – Зміна редукційного коефіцієнта залежно від частоти

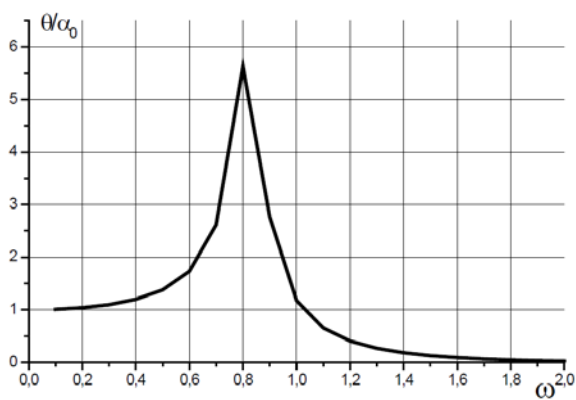


Рисунок 6.19 – Амплітудно-частотна характеристика бортової хитавиці

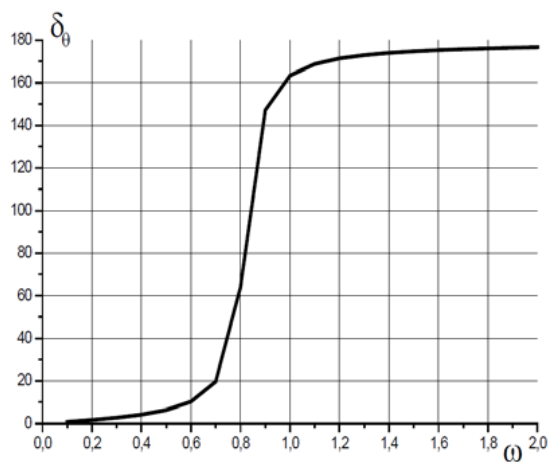


Рисунок 6.20 – Фазово-частотна характеристика бортової хитавиці

Приклад розрахунків бортової хитавиці корабля на регулярному хвилюванні

Вихідні розміри й параметри корабля: $L = 90$ м; $B = 12,85$ м; $T = 3,88$ м; $H = 7,44$ м; $\delta = 0,65$; $\alpha = 0,747$; $z_c = 2,07$ м; $r = 3,6$ м; $h_0 = 1,44$ м; $z_g = 3,99$ м.

Момент інерції маси корпусу розраховано за формулою Шиманського (6.36): $J_x = 50970$ тм².

Власна частота бортової хитавиці розрахована за формулою (6.29): $n_\theta = 0,823$ 1/с.

Коефіцієнти демпфірування й моменту інерції приєднаних мас, певні по номограмах, $\frac{\lambda_{44}}{J_{VE}} = 0,42$; $w'_\lambda = 0,113$.

За формулами (6.37) і (6.40) розраховано $\lambda_{44} = 11400$ тм²; $2\nu_\theta = 0,096$ 1/с.

Таблиця 6.3 – Розрахунки бортової хитавиці на регулярному хвилюванні

ω	κ_0	$\kappa_0 n_0^2$	$n_0^2 - \omega^2$	$(4)^2$	$(2\nu_0\omega)^2$	$(5) + (6)$	$\sqrt{(7)}$	$\frac{\theta_m}{\alpha_0} = \frac{(3)}{(8)}$	$\frac{(6)}{(4)}$	$\delta_0 = \arctg(10)$ град
0,1	0,995	0,67	0,667	0,445	0	0,445	0,667	1,009	0,014	0,82
0,2	0,979	0,66	0,637	0,406	0	0,406	0,638	1,04	0,03	1,72
0,3	0,953	0,64	0,587	0,345	0,001	0,346	0,588	1,098	0,049	2,8
0,4	0,918	0,62	0,517	0,268	0,001	0,269	0,519	1,198	0,074	4,24
0,5	0,874	0,59	0,427	0,183	0,002	0,185	0,43	1,377	0,112	6,4
0,6	0,824	0,55	0,317	0,101	0,003	0,104	0,322	1,731	0,181	10,28
0,7	0,769	0,52	0,187	0,035	0,005	0,04	0,199	2,617	0,358	19,72
0,8	0,709	0,48	0,037	0,001	0,006	0,007	0,085	5,632	2,06	64,11
0,9	0,647	0,43	-0,133	0,018	0,007	0,025	0,158	2,768	-0,65	146,98
1	0,584	0,39	-0,323	0,104	0,009	0,113	0,337	1,175	-0,297	163,46
1,1	0,522	0,35	-0,533	0,284	0,011	0,295	0,543	0,651	-0,198	168,8
1,2	0,461	0,31	-0,763	0,582	0,013	0,595	0,771	0,405	-0,151	171,42
1,3	0,403	0,27	-1,013	1,026	0,016	1,041	1,02	0,268	-0,123	172,98
1,4	0,349	0,23	-1,283	1,646	0,018	1,664	1,29	0,183	-0,105	174,03
1,5	0,299	0,20	-1,573	2,474	0,021	2,494	1,579	0,128	-0,091	174,78
1,6	0,253	0,17	-1,883	3,545	0,024	3,568	1,889	0,091	-0,081	175,34
1,7	0,212	0,14	-2,213	4,896	0,027	4,923	2,219	0,065	-0,074	175,79
1,8	0,175	0,11	-2,563	6,568	0,03	6,598	2,569	0,046	-0,067	176,15
1,9	0,144	0,09	-2,933	8,601	0,033	8,634	2,938	0,033	-0,062	176,45
2	0,117	0,07	-3,323	11,04	0,037	11,078	3,328	0,024	-0,058	176,7

6.3.2 Розрахунки бортової хитавиці корабля на нерегулярному хвилюванні

Розрахунки будь-якого виду хитавиці, в тому числі й бортовий, на нерегулярному хвилюванні засновані на застосуванні формули Хінчина, що встановлює зв'язок між спектральною щільністю вхідного процесу (хвилювання) і спектральною щільністю вихідного процесу (хитавиця):

$$S_{\theta}(\omega) = |\Phi_{\theta\alpha}(\omega)|^2 \cdot S_{\alpha}(\omega), \quad (6.47)$$

де $|\Phi_{\theta\alpha}|$ – модуль передатної функції, дорівнює коефіцієнту динамічності хитавиці на регулярному хвилюванні:

$$|\Phi_{\theta\alpha}| = \frac{\theta_m}{\alpha_0}; \quad (6.48)$$

$S_{\alpha}(\omega)$ – спектральна щільність ухилів хвилювання.

Розрахунки спектральної щільності бортової хитавиці на нерегулярному хвилюванні проводяться в наступній послідовності.

1) Для розрахунків спектра хвилювання використовуються формула Вознесенського–Нецветасєва

$$S_r(\omega) = \frac{9,43}{\omega_{cp}} D_r \left(\frac{\omega_{max}}{\omega} \right)^6 \exp \left[-1,5 \left(\frac{\omega_{max}}{\omega} \right)^4 \right], \quad (6.49)$$

де

$$\omega_{max} = 0,777\omega_{cp}; \quad \omega_{cp} = \frac{2\pi}{\tau_{cp}}; \quad D_r = 0,0358h_{3\%}^2.$$

Тут ω_{cp} , τ_{cp} – середні частота й період морського нерегулярного хвилювання; D_r – дисперсія ординат хвильового профілю.

Висоту хвилі трипроцентної забезпеченості $h_{3\%}$ визначено за шкалою бальності хвилювання Головного управління гідрометеорологічної служби (ГУГМС), обираючи для заданої бальності її максимальне значення з табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Залежність висоти хвилі від бальності хвилювання

Бал	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Висота хвилі $h_{3\%}$, (м)	До 0,25	0,25–0,75	0,75–1,25	1,25–2	2–3,5	3,5–6	6–8,5	8,5–11	>11

Для вибору розрахункових значень середніх періодів $\tau_{\text{ср}}$ використано табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Залежність періоду хвилі від бальності

Бал	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Середній період $\tau_{\text{ср}}$ (с)	1...2	2...3	3...4	4...5	5...7	7...9	9...11	11...12	>12

Спектральна щільність ухилів хвилювання $S_{\alpha}(\omega)$ пов'язана зі спектральною щільністю ординат хвилювання $S_r(\omega)$ наступною залежністю:

$$S_{\alpha}(\omega) = k^2 S_r(\omega) \left(\frac{180}{\pi} \right)^2, \quad (6.50)$$

де $k = \frac{\omega^2}{g}$ – хвильове число.

2) Використовуючи значення коефіцієнтів динамічності, обчислених за формулами (6.34), як передатних функцій і підставляючи їх у (6.46), знайдемо спектральну щільність кутових переміщень при бортовій хитавиці $S_{\theta}(\omega)$.

Спектральні щільності швидкостей і прискорень обчислюються за залежностями

$$S_{\dot{\theta}}(\omega) = \omega^2 S_{\theta}(\omega); \quad (6.51)$$

$$S_{\ddot{\theta}}(\omega) = \omega^4 S_{\theta}(\omega). \quad (6.52)$$

3) Для визначення дисперсій кутових переміщень, швидкостей і прискорень використаємо відомі формули зв'язку між дисперсіями та спектрами:

$$\begin{aligned}
 D_{\theta} &= \int_0^{\infty} S_{\theta}(\omega) d\omega; \\
 D_{\dot{\theta}} &= \int_0^{\infty} S_{\dot{\theta}}(\omega) d\omega; \\
 D_{\ddot{\theta}} &= \int_0^{\infty} S_{\ddot{\theta}}(\omega) d\omega.
 \end{aligned} \tag{6.53}$$

Застосовуючи правило трапецій для визначення інтегралів, що входять у (6.53) і враховуючи, що при $\omega \rightarrow 0$ і при $\omega \rightarrow \infty$ $S_{\theta}, S_{\dot{\theta}}, S_{\ddot{\theta}} \rightarrow 0$, отримаємо

$$\begin{aligned}
 D_{\theta} &\cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_{\theta}; \\
 D_{\dot{\theta}} &\cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_{\dot{\theta}}; \\
 D_{\ddot{\theta}} &\cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_{\ddot{\theta}},
 \end{aligned} \tag{6.54}$$

де N – кількість розрахункових частот.

4) Знаючи значення дисперсій, можна визначити всі статистичні характеристики бортової хитавиці у формулах;

– середні амплітуди хитавиці (забезпеченість 45,6 %)

$$\theta_{cp} = 1,25\sqrt{D_{\theta}}; \tag{6.55}$$

– амплітуди 3%-ої забезпеченості

$$\theta_{3\%} = 2,64\sqrt{D_{\theta}}; \tag{6.56}$$

– максимальні амплітуди (забезпеченість 0,5 %)

$$\theta_{max} = 3,25\sqrt{D_{\theta}}; \tag{6.57}$$

– амплітудні значення швидкостей

$$\dot{\theta}_{cp} = 1,25\sqrt{D_{\dot{\theta}}};$$

$$\dot{\theta}_{3\%} = 2,64\sqrt{D_{\dot{\theta}}} ; \quad (6.58)$$

$$\dot{\theta}_{\max} = 3,25\sqrt{D_{\dot{\theta}}} ;$$

– амплітудні значення прискорень визначаються відповідно через дисперсії $D_{\ddot{\theta}}$ аналогічними залежностями:

$$\ddot{\theta}_{cp} = 1,25\sqrt{D_{\ddot{\theta}}} ;$$

$$\ddot{\theta}_{3\%} = 2,64\sqrt{D_{\ddot{\theta}}} ; \quad (6.59)$$

$$\ddot{\theta}_{\max} = 3,25\sqrt{D_{\ddot{\theta}}} .$$

Розрахунки бортової хитавиці корабля проводяться для двох бальностей (6 і 8 балів) у табличній формі (табл. 6.6). За результатами розрахунків будуються графіки спектральних щільностей хвилювання й хитавиці для кожного значення бальності (рис. 6.21, 6.22) і приводиться таблиця статистичних характеристик (табл. 6.7).

Приклад розрахунків бортової хитавиці корабля на нерегулярному хвилюванні

Розрахунки проводяться для корабля, що рухається на 6-бальному хвилюванні.

За таблицями бальності визначаємо вихідні характеристики хвилювання: $h_{3\%} = 6$ м; $\tau_{cp} = 9$ с.

Таблиця 6.6 – Розрахунки бортової хитавиці на нерегулярному хвилюванні 6 балів

ω	S_r	S_a	$\Phi_{\theta a}$	$\Phi_{\theta a}^2$	S_{θ}	$\omega^2 S_{\theta}$	$\omega^4 S_{\theta}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0	0	1,009	1,019	0	0	0
0,2	0	0	1,040	1,081	0	0	0
0,3	0,00007	0,00002	1,098	1,205	0	0	0
0,4	0,68	0,592	1,198	1,436	0,85	0,136	0,02

Продовж. табл. 6.6

ω	S_r	S_α	$\Phi_{0\alpha}$	$\Phi_{0\alpha}^2$	S_θ	$\omega^2 S_\theta$	
0,5	3,58	7,5	1,377	1,897	14,3	3,593	0,89
0,6	3,49	15,42	1,731	2,997	46,2	16,647	5,99
0,7	2,14	17,97	2,61	6,848	123,1	60,329	29,5
0,8	1,25	17,21	5,63	31,722	546	349,569	223
0,9	0,68	15,32	2,768	7,66	117,3	95,089	77,0
1	0,35	13,25	1,175	1,381	18,35	18,354	18,35
1,1	0,21	11,44	0,651	0,424	4,848	5,866	7,09
1,2	0,11	9,86	0,405	0,164	1,619	2,331	3,35
1,3	0,08	8,55	0,268	0,072	0,613	1,036	1,75
1,4	0,055	7,46	0,183	0,034	0,25	0,491	0,96
1,5	0,035	6,55	0,128	0,016	0,107	0,242	0,54
1,6	0,022	5,79	0,091	0,008	0,048	0,122	0,31
1,7	0,009	5,15	0,065	0,004	0,022	0,062	0,18
1,8	0,088	4,61	0,046	0,002	0,01	0,032	0,10
1,9	0,088	4,14	0,033	0,001	0,005	0,016	0,05
2	0,007	3,75	0,024	0,001	0,002	0,008	0,03
Σ	—	—	—	—	874	553	369

Визначаємо дисперсії:

$$D_\theta \cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_\theta = 0,1 \cdot 874,06 = 87,406;$$

$$D_{\dot{\theta}} \cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_{\dot{\theta}} = 0,1 \cdot 553 = 55,392;$$

$$D_{\ddot{\theta}} \cong \Delta\omega \sum_{n=1}^N S_{\ddot{\theta}} = 0,1 \cdot 369,97 = 36,997.$$

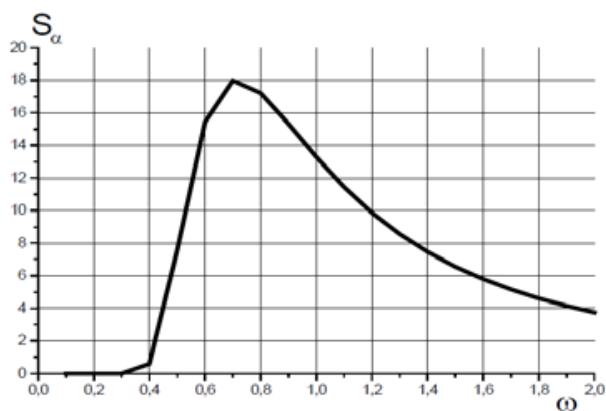


Рисунок 6.21 – Спектральна щільність кутів хвильового схилю

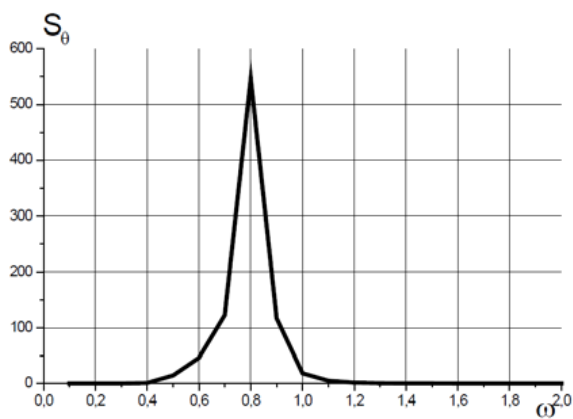


Рисунок 6.22 – Спектральна щільність кутових переміщень при бортовій хитавиці

Таблиця 6.7 – Статистичні характеристики хитавиці

$\bar{\theta}$ (град)	11,69
$\theta_{3\%}$ (град)	24,68
$\theta_{\max}$ (град)	30,39
$\bar{\dot{\theta}}$ (град/с)	9,30
$\dot{\theta}_{3\%}$ (град/с)	19,65
$\dot{\theta}_{\max}$ (град/с)	24,19
$\bar{\ddot{\theta}}$ (град/с ²)	7,603
$\ddot{\theta}_{3\%}$ (град/с ²)	16,058
$\ddot{\theta}_{\max}$ (град/с ²)	19,77

При розрахунках спектрів усі кути підставлялися в радіанах, але в табл. 6.7 зроблено переведення у градуси (множенням величин на 57,3).

6.4 Прикладні розрахунки параметрів хитавиці корабля під час експлуатації

Приклади розв'язання задач

Задача 1. Розрахувати осадку корабля T та інерційний коефіцієнт c для вантажного корабля, якщо відомо, що його довжина $L = 139,5$ м; період вертикальної хитавиці $T_{\zeta} = 7,2$ с, співвідношення $\frac{L}{B} = 8,76$; період бортової хитавиці складає $T_{\theta} = 14,4$ с; початкова поперечна метацентрична висота – $h = 1,05$ м.

Розв'язання. Із формули (3.16) для періоду вертикальної хитавиці $T_{\zeta} = 2,5\sqrt{T}$.

Очевидно, що $T = \left(\frac{T_{\zeta}}{2,5} \right)^2 = \left(\frac{7,2}{2,5} \right) = 8,30$ м. Через співвідношення довжини та ширини корабля $\frac{L}{B} = 8,76$ знайдемо ширину, як $B = \frac{L}{8,67} = \frac{139,5}{8,67} = 15,93$ м. Використовуючи залежність (3.16) для періоду бортової хитавиці $T_{\theta} = c \frac{B}{\sqrt{h}}$, зрозуміло, що $c = \frac{T_{\theta} \cdot B}{\sqrt{h}} = \frac{14,4 \cdot 15,93}{\sqrt{1,05}} = 0,93$.

Відповідь: 8,30 м; 0,93.

Задача 2. Знайти періоди вертикальної T_{ζ} та кільової хитавиці для корабля, якщо відомо: довжина корабля $L = 126,8$ м; осадка носом $T_{\text{Н}} = 7,13$ м; кут диференту $\psi = -0,15^{\circ}$.

Розв'язання. Із курсу статики корабля відомо, що диферент – це різниця осадки між носовою та кормовою, тобто $\delta T = T_{\text{Н}} - T_{\text{К}}$, а розрахувати його можна за залежністю $\delta T = L \cdot \operatorname{tg} \psi = 126,8 \cdot \operatorname{tg}(-0,15^{\circ}) = -0,33$ м. Осадка кормою складатиме $T_{\text{К}} = -\delta T + T_{\text{Н}} = -(-0,33) + 7,13 = 7,46$ м. Середня осадка складатиме $T = \frac{T_{\text{Н}} + T_{\text{К}}}{2} = \frac{7,13 + 7,46}{2} = 7,30$ м.

Періоди вертикальної та кільової хитавиць дорівнюватимуть відповідно

$$T_{\zeta} = 2,5\sqrt{T} = 2,5\sqrt{7,30} = 6,8 \text{ с};$$

$$T_{\psi} = 2,4\sqrt{T} = 2,5\sqrt{7,30} = 6,5 \text{ с}.$$

Відповідь: 6,8 с; 6,5 с.

Задача 3. Розрахувати відносну швидкість $v_{\text{відн}}$, висоту $h_{\text{хв}}$ та період τ хвилі, якщо відомо, що довжина хвилі $\lambda = 125$ м, курсовий кут $q = 87^\circ$, а швидкість корабля $v_s = 7,8$ вузлів.

Розв'язання. Фазову швидкість розраховано за залежністю (2.14') $v_\phi \cong 1,25\sqrt{\lambda} = 1,25\sqrt{125} = 14,0$ м/с.

Відносну швидкість розраховано за залежністю (2.14) $v_{\text{відн}} = v_\phi + v_s \cos q = 14,0 + 0,514 \cdot 7,8 \cdot \cos 87^\circ = 14,1$ м/с.

Висота хвилі визначена за формулою (2.8) $h_B \cong 0,17\lambda^{0,75} = 0,17 \cdot 125^{0,75} = 6,5$ м.

Період хвилі розрахований за залежністю (2.7) $\tau = 0,8\sqrt{\lambda} = 0,8\sqrt{125} = 9$ с.

Відповідь: 14,0 м/с; 14,1 м/с; 6,5 м; 9 с.

Задача 4. Визначити довжину хвилі λ , резонансний та білярезонансні курсові кути q при плаванні корабля на регулярному хвилюванні за допомогою універсальної штормової діаграми Ю. Ремеза, якщо відомо, що швидкість корабля $v_s = 12$ вузлів, курсовий кут $q = 120^\circ$, період хвилі, який задається $\tau_K = 11,0$ с, а період бортової хитавиці $T_\theta = 10,0$ с.

Розв'язання-відповідь. На універсальній штормовій діаграмі (рис. 6.23) на перетині заданих величин швидкості корабля $v_s = 12$ вузлів та курсового кута $q = 120^\circ$ відкладено точку 1. Від неї вгору проведено вертикаль до перетину із кривою періоду хвилі, який задається, $\tau_K = 11,0$ с – точка 2. Ця точка відповідає довжині хвилі $\lambda = 106$ м. Із точки 2 проведено горизонталь до перетину із кривою періоду бортової хитавиці $T_\theta = 10,0$ с – точка 3. З точки 3 опущено вертикаль донизу до перетину із кривою, яка відповідає швидкості $v_s = 12$ вузлів – точка 4. Ця точка визначає резонансний курсовий кут $q = 108^\circ$.

Для визначення білярезонансних кутів q розраховано граничні значення періодів хитаவிசி. Для цього у верхній частині діаграми на «середній лінійці» для періодів

бортової хитавиці для значення $T_{\theta} = 10,0$ с нанесено точку 5. З неї вверх та вниз проведено вертикалі до «лінійок» $T_{\zeta}/1,3$ та $T_{\zeta}/0,7$. Відповідно отримано граничні значення періодів хитавиці 8 с та 14 с.

З точки 2 проведено горизонталь до перетинів із значеннями періодів 8 с та 14 с. Отримано відповідно точки 6 та 7. З цих точок опущено вертикалі вниз до перетину із кривою, яка відповідає швидкості $v_s = 12$ вузлів. Ці точки визначають курсові кути 145° та 85° , які характеризують білярезонансну зону.

6.5 Задачі для самостійного розв'язання

1. Визначити довжину хвилі λ , резонансний та білярезонансні курсові кути q при плаванні на регулярному хвилюванні за допомогою універсальної штормової діаграми, якщо відомо: швидкість корабля $v_s = 10,0$ вузлів, висота хвилі $h_B = 6,0$ м, період бортової хитавиці $T_{\theta} = 9,0$ с.

2. Розрахувати періоди вертикальної T_{ζ} , кильової T_{ψ} та бортової T_{θ} хитавиці для корабля, якщо його осадка $T = 4,50$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,78$, ширина $B = 12,0$ м, поперечна метацентрична висота $h = 0,80$ м.

3. Визначити періоди кильової T_{ψ} та бортової T_{θ} хитавиці для корабля, якщо відомо: осадка носом $T_H = 1,52$ м, осадка кормою $T_K = 3,45$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,81$, ширина $B = 11,6$ м, поперечна метацентрична висота $h = 0,55$ м.

4. Розрахувати періоди вертикальної T_{ζ} та кильової T_{ψ} хитавиці корабля, якщо відомо, що його довжина $L = 75,3$ м, а співвідношення головних розмірювань $\frac{L}{B} = 7,17$; $\frac{B}{T} = 3,00$.

5. Знайти періоди вертикальної T_{ζ} та бортової T_{θ} хитавиці корабля, якщо його інерційний коефіцієнт $c = 0,77$, ширина $B = 13,2$ м, поперечна метацентрична висота $h = 0,16$ м. Порівняти отримані періоди із допустимими [3].

6. Визначити поперечну метацентричну висоту h та період кильової хитавиці T_ψ для корабля, якщо його довжина $L = 92,5$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,83$, період бортової хитавиці $T_\theta = 14,2$ с, співвідношення головних розмірювань $\frac{L}{B} = 6,24$; $\frac{B}{T} = 2,87$.

7. Розрахувати кут диференту ψ та період вертикальної хитавиці T_ζ для корабля, якщо його осадка носом $T_H = 3,41$ м, осадка кормою $T_K = 3,56$ м, а довжина $L = 110$ м.

8. Визначити довжину хвилі λ , резонансний та білярезонансні курсові кути q при плаванні на регулярному хвилюванні за допомогою універсальної штормової діаграми, якщо відомо: швидкість корабля $v_s = 11,0$ вузлів, висота хвилі $h_B = 3,2$ м, період бортової хитавиці $T_\theta = 12,0$ с.

9. Розрахувати відносну швидкість $v_{\text{відн}}$, висоту $h_{\text{хв}}$ та період τ хвилі, якщо відомо, що довжина хвилі $\lambda = 128$ м, курсовий кут $q = 12^\circ$, а швидкість корабля $v_s = 6,1$ вузлів.

10. Розрахувати ширину B та осадку T корабля, якщо його інерційний коефіцієнт $c = 0,72$, період бортової хитавиці $T_\theta = 11,0$ с, поперечна метацентрична висота $h = 1,01$ м, а період кильової хитавиці $T_\psi = 7,2$ с.

11. Знайти довжину L та період кильової хитавиці T_ψ для корабля, якщо його осадка кормою $T_K = 5,45$ м, ширина $B = 16,8$ м, співвідношення $\frac{B}{T} = 3,21$, а кут диференту $\psi = -1,2^\circ$.

12. Визначити ширину B та період вертикальної хитавиці T_ζ для корабля, якщо його осадка носом $T_H = 2,67$ м, осадка кормою $T_K = 3,08$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,83$, період бортової хитавиці $T_\theta = 12,0$ с, а поперечна метацентрична висота $h = 1,08$ м.

13. Розрахувати кут диференту ψ та період бортової хитавиці T_θ корабля, якщо його диферент $\delta T = -0,31$ м,

осадка $T = 4,89$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,84$ м, поперечна метацентрична висота $h = 1,09$ м, співвідношення головних розмірювань $\frac{L}{B} = 7,34$; $\frac{B}{T} = 3,47$.

14. Розрахувати осадку T та інерційний коефіцієнт c для корабля, якщо відомо, що його довжина $L = 128,0$ м, період вертикальної хитамиці $T_{\zeta} = 7,1$ с, співвідношення довжини до ширини $\frac{L}{B} = 8,31$, період бортової хитамиці

$T_{\theta} = 14,1$ с, поперечна метацентрична висота $h = 1,02$ м.

15. Знайти періоди вертикальної T_{ψ} та кільової T_{θ} хитамиці для корабля, якщо його довжина $L = 127,0$ м, осадка носом $T_{\text{Н}} = 6,17$ м, кут диференту $\psi = -0,2^{\circ}$.

16. Визначити поперечну метацентричну висоту корабля h та його диферент δT , якщо його ширина $B = 18,5$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,70$, період бортової хитамиці $T_{\theta} = 14,0$ с, співвідношення ширини до осадки $\frac{B}{T} = 2,49$, а осадка кормою $T_{\text{К}} = 7,38$ м.

17. Визначити довжину L та ширину B корабля, якщо його інерційний коефіцієнт $c = 0,73$, період бортової хитамиці $T_{\theta} = 12,0$ с, поперечна метацентрична висота $h = 1,49$ м, період кільової хитамиці $T_{\psi} = 4,1$ с, осадка носом $T_{\text{Н}} = 2,81$ м, кут диференту $\psi = -0,18^{\circ}$.

18. Розрахувати кут диференту ψ корабля та його інерційний коефіцієнт c , якщо його довжина $L = 65,0$ м, ширина $B = 9,8$ м, осадка носом $T_{\text{Н}} = 1,44$ м, осадка кормою $T_{\text{К}} = 2,13$ м, період бортової хитамиці $T_{\theta} = 11,8$ с, поперечна метацентрична висота $h = 0,48$ м.

19. Знайдіть періоди вертикальної T_{ζ} та кільової T_{ψ} хитамиці корабля, якщо його водотоннажність $V = 1080$ м³,

довжина $L = 62,9$ м, ширина $B = 8,80$ м, коефіцієнт загальної повноти $\delta = 0,745$.

20. Визначте диферент δT та інерційний коефіцієнт c для корабля, якщо відома його водотоннажність $V = 1160$ м³, довжина, $L = 68,8$ м, коефіцієнт прокольної гостроти $\chi = 0,731$, коефіцієнт повноти мідель-шпангоута $\beta = 0,936$, середня осадка $T = 2,78$ м, осадка кормою $T_K = 2,85$ м, період бортової хитавиці $T_\theta = 14,1$ с, поперечна метацентрична висота $h = 0,54$ м.

21. Розрахувати поперечну метацентричну висоту h та період кильової хитавиці T_ψ для корабля, якщо його водотоннажність $D = 2100$ т, ширина $B = 9,5$ м, період бортової хитавиці $T_\theta = 10,7$ с, співвідношення ширини до осадки $\frac{B}{T} = 2,19$, інерційний коефіцієнт $c = 0,88$, коефіцієнт повноти водотоннажності $\delta = 0,70$, а питома вага забортної води $\gamma = 1,03$ т/м³.

22. Визначити поперечну метацентричну висоту корабля h та його диферент δT , якщо його ширина $B = 17,5$ м, інерційний коефіцієнт $c = 0,75$, період бортової хитавиці $T_\theta = 12,0$ с, співвідношення ширини до осадки $\frac{B}{T} = 2,49$, а осадка кормою $T_K = 6,18$ м.

23. Розрахувати висоту хвилі $h_{\text{хв}}$, період хвилі τ та її відносну швидкість $v_{\text{відн}}$, якщо довжина хвилі $\lambda = 120$ м, курсовий кут $q = 89^\circ$, а швидкість корабля $v = 13$ вузлів.

24. Знайти довжину L та період кильової хитавиці T_ψ для корабля, якщо його осадка кормою $T_K = 5,41$ м, ширина $B = 13,2$ м, співвідношення $\frac{B}{T} = 2,81$, а кут диференту $\psi = -1,3^\circ$.

25. Знайти періоди вертикальної T_ζ та бортової T_θ хитавиці корабля, якщо його інерційний коефіцієнт $c = 0,72$, ширина $B = 11,4$ м, поперечна метацентрична висота $h = 0,12$ м.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маков, Ю. Л. Качка судов : учеб. пособие / Ю. Л. Маков. – Калининград : Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. – 321 с.
2. Сизов, В. Г. Теория корабля : учеб. пособ. / В. Г. Сизов. – ОНМА. – Одесса : ФЕНЖС, 2003. – 284 с.
3. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. – К., 2014.
4. Гидромеханика : учебник / А. Ш. Ашкинадзе [и др.]. – СПб.: Мор. Вест., 2007. – 551 с.
5. Ремез, Ю. В. Качка корабля : учебник / Ю. В. Ремез. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 328 с.
6. Рябченко, В. К. Устройство судна : учебное пособие / В. К. Рябченко, Ю. П. Кучер. – Одесса: Феникс, 2006. – 116 с.
7. Жинкин, В. Б. Теория и устройство корабля : учебник / В. Б. Жинкин. – 3-е изд., стереотип. – СПб. : Судостроение, 2002. – 336 с.
8. Благовещенский, С. Н. Справочник по статике и динамике корабля : учебник : в 2 т. / С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Т. 2: Динамика (качка) корабля. – Л. : Судостроение, 1975. – 176 с.
9. Новиков, А. И. Оценка посадки, остойчивости и прочности судна в процессе эксплуатации : учебное пособие для ВТУЗов / А. И. Новиков. – 2-е изд., испр. – Севастополь : СевНТУ, 2005 – 136 с.

10. Федотов, Д. Г. Теория и устройство корабля : учеб. пособ. / Д. Г. Федотов. – Северодвинск : АФ СПбГМТУ, 2008. – 78 с.

11. Аносов, А. П. Теория и устройство судна : учеб. пособ. / А. П. Аносов. – Москва : Юрайт, 2018. – 182 с.

12. Луговский, В. В. Гидромеханика : учебник / В. В. Луговский. – Ленинград : Судостроение, 1990. – 192 с.

13. Кошкин, С. В. Основы расчетов по статике и ходкости судов : учебное пособие / С. В. Кошкин, Н. С. Гуменюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Комсомольск-на-Амуре : «КНАГТУ», 2011. – 64 с.

14. Русецкий, А. А. Оборудование и организация гидроаэродинамических лабораторий / А. А. Русецкий. – Л. : Судостроение, 1975. – 151 с.

15. Шулейкин, В. В. Физика моря. Том 1. Динамика моря. Термика моря. Оптика моря : учебник / В. В. Шулейкин. – Москва : Наука, 1968. – 1090 с.

16. Архипкин, В. С. Океанология. Физические свойства морской воды : учебное пособие / В. С. Архипкин, С. А. Добролюбов. – М. : Юрайт, 2018. – 216 с.

17. Новиков, А. И. Океан и океанотехника : учебник / А. И. Новиков. – Севастополь : Изд-во «Кручинин Л.Ю.», 2010. – 436 с.

18. Ефремова, Н. В. Экспериментальные исследования дифрагированного волнового поля вблизи судна на мелководье / Н. В. Ефремова // Вісник Одеського державного морського університету. – Одеса. – 1998. – № 1. – С. 86–89.

19. Соломенцев, О. И. Остойчивость и бортовая качка катамарана с гидродинамической разгрузкой / О. И. Соломенцев, А. С. Кныш // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2013. – № 4. – С. 4–10.

20. Solomyentsev, O. I. Rolling and Dynamic Stability of the High – Speed Ships [Text] / O. I. Solomyentsev // International Conference of Fast Ships: Malek Ashtar University of Technology. – Shiraz, 2005. – 20 p.
21. K. Hutter, V. Vlasenko, N. Filatov Nonlinear Internal Waves in Lakes/ Berlin : Springer–Verlag Berlin Heidelberg. – 2012. – 277 p. ISBN: 978-3-642-23437-8.
22. Давыдов, И. Ф. Оценка параметров бортовой качки судов смешанного плавания в условиях реального морского волнения / И. Ф. Давыдов // Труды междунар. конф. «Проблемы прочности и эксплуатационной надежности судов» ПЭНС-99. – Владивосток, 1999. – С. 221–222.
23. Егоров, Г. В. Обоснование надводного борта рейдового перевалочного комплекса с трюмом безлюковых закрытий расчетным моделированием качки и заливаемости / Г. В. Егоров, И. Ф. Давыдов, В. И. Тонюк // Вісник Одеського національного морського університету. – 2018. – Вип. 1. – С. 43–60. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vonmu_2018_1_6.
24. Некрасов, В. А. Вероятностные задачи мореходности судов. Колебания, локальная и нелокальная устойчивость динамической системы при действии случайных возмущений / В. А. Некрасов // Л. : Судостроение, 1978. – 304 с.
25. Баскаков, С. Н. Результаты расчётного и экспериментального исследования качки прямобортных понтонов на волнении / С. Н. Баскаков // Вісник Одеського національного морського університету. – 2012. – Вип. 1 (34). – С. 49–67.
26. Храмушин, В. Н. История штормовой мореходности (от древности до наших дней) / В. Н. Храмушин, С. В. Антоненко, А. А. Комарицын, П. Ф. Бровко, А. С. Втюрина, М. Л. Красный, А. Е. Малащенко, Ю. И. Недорез, А. Е. Солдатенков, О. Э. Суоров, А. В. Файн, В. А. Шустин // Южно-Сахалинск : Сахалинское книжное изд-во, 2004. – 288 с.

27. Храмушин, В. Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля / В. Н. Храмушин. – Владивосток : Дальнаука, 2003. – 172 с.

28. Чижиумов, С. Д. Численные модели в задачах динамики судна / С. Д. Чижиумов. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1999. – 182 с.

29. Rawson K. J., Tupper E. C. Basic ship theory. Vol. 2, Butterworth–Heinemann, 2001. – 731 p.

Навчальне видання

ЩЕДРОЛОСЄВ Олександр Вікторович
БОНДАРЕНКО Олександр Валентинович
КОНОВАЛОВА Ганна Василівна
СОЦЕНКО Владислав Валерійович

ХИТАВИЦЯ СУДНА

Навчальний посібник

Комп'ютерне верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *О. Є. Вакула*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,1. Тираж 100 прим. Вид. № 17. Зам. № 0906-21.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.