

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. О. НЕКРАСОВ

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВУЧОСТІ,
ОСТІЙНОСТІ ТА НЕПОТОПЛЮВАНОСТІ
СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2007

УДК 629.12: 532.(075.8)

В.О. Нєкрасов. Збірник лабораторних робіт з дослідження плавучості, остійності та непотоплюваності судна на тихій воді. – Миколаїв: НУК, 2007. – 88 с.

Кафедра теорії та проектування суден

Подано опис і методику самостійного виконання лабораторних робіт з розділу "Статика корабля" курсу "Теорія корабля".

Для забезпечення самостійності виконання лабораторних робіт в описі кожної з них містяться відповідні теоретичні відомості, перелік необхідного устаткування, інструкції для роботи з ним, наведено послідовність виконання роботи та контрольні питання до неї.

У підготовці лабораторної роботи № 2 взяв участь канд. техн. наук, доц. Б.О. Цибенко.

Призначено для студентів спеціальності 8.100201 – "Кораблі та океанотехніка", а також для студентів інших спеціальностей кораблебудівного профілю.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Н.Б. Сліжевський

Розділ 1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка призначена для лабораторного дослідження плавучості, остійності та непотоплюваності судна на тихій воді.

1.1. Основні компоненти експериментальної установки

Основними компонентами установки (рис. 1) є: модель зі спеціальним обладнанням; бак з водою; електрична система для вимірювання осадки моделі та її нахилів; перетворювач електричних сигналів датчиків осадки, кутів крену і диференту в цифрові сигнали для персонального комп'ютера (ПК); обчислювальний комплекс на основі ПК; реєструючі пристрої ПК (дисковод, принтер). Додається методична інструкція до виконання лабораторних робіт.



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки

1.2. Опис компонент експериментальної установки

Модель довжиною 1,76 м має склопластиковий корпус, металеві надбудови (носову й кормову) і спеціальне обладнання, що включає в себе: систему основного баласту для забезпечення посадки моделі по задану ватерлінію та для регулювання остійності моделі (носовий 1, середній 2 і кормовий 3 пристрої – рис. 2, 3);

відкритий трюм 4 розмірами 0,50×0,37×0,20 м, що забезпечує зручне обслуговування середнього пристрою 2, стерпних 2*a* і регулювальних 2*b* вагів, а також вільний доступ до датчика осадки 5 і датчиків крену й диференту 6 (рис. 4);

трюмну систему регулювальних ваг 2*a*, 2*b* (середній пристрій 2 системи основного баласту), що забезпечує малі зміни заданої середньої осадки моделі та її малі нахили на тихій воді (див. рис. 4);

датчик осадки 5 і гіроскопічний датчик 6, що необхідні для вимірювання параметрів положення моделі відносно вільної поверхні води (див. рис. 4);

марки осадки 7 для візуального визначення заглиблення моделі (рис. 5);

кутомір маятникового типу 8 для візуального визначення кутів крену й диференту моделі в градусах (закріплений на щоглі кормової надбудови) – див. рис. 2;

систему кренбаласту 9, що забезпечує виконання дослідження кренування моделі на тихій воді при визначенні її початкової остійності (див. рис. 4);

підвішений вантаж 10 із ниткою підвісу та кріпленням нитки підвісу, призначений для дослідження впливу підвішеного вантажу на початкову остійність судна (див. рис. 3);

палубну цистерну 11 розмірами 0,20×0,36×0,10 м, що потрібна для дослідження впливу рідкого вантажу на початкову остійність судна (див. рис. 3);

внутрішні цистерни: носову 12 і кормову 13 із системами подачі й зливу води для дослідження непотоплюваності судна (див. рис. 3);

розбірний інклінометр із вагами 14 для дослідження остійності судна при великих кутах крену (рис. 6);

розбірні скульові кілі з кріпленнями 15, що призначені для дослідження ослаблення бортової качки (див. рис. 5);

носовий 16 і кормовий 17 стрижні для поздовжньої орієнтації моделі в резервуарі з забортною водою і для забезпечення вільного спливання і вільних нахилів моделі (рис. 7).

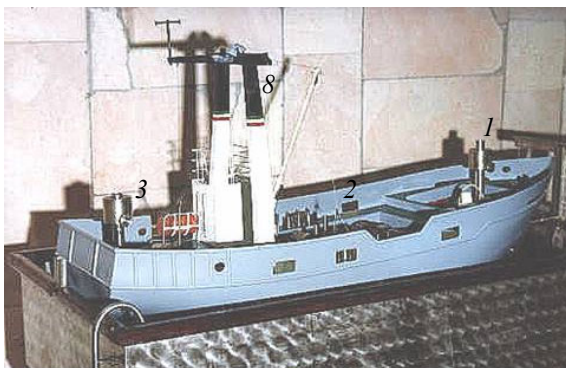


Рис. 2. Система основного баласту – 1, 2 і 3-й пристрої
(8 – кутомір маятникового типу для виміру кутів крену й диференту)

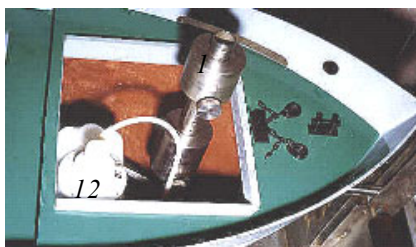
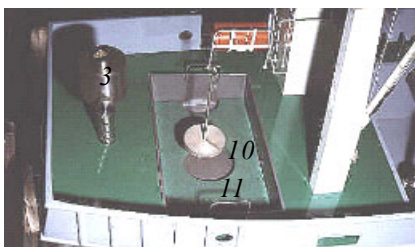


Рис. 3. Носовий 1 і кормовий 3 пристрої системи основного баласту
(10 – підвішений вантаж; 11 – палубна цистерна; 12 – внутрішня цистерна (затоплюваний відсік))

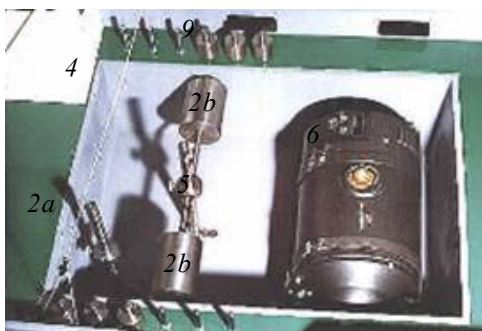


Рис. 4. Трюм і його вміст
(2a, 2b – компоненти пристрою 2 системи основного баласту, 9 – система кренбаластів для дослідження кренування)



Рис. 5. Марка осадки 7 і скуловий кіль 15

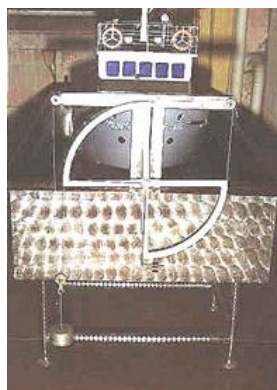


Рис. 6. Розбірний інклінометр із вагами

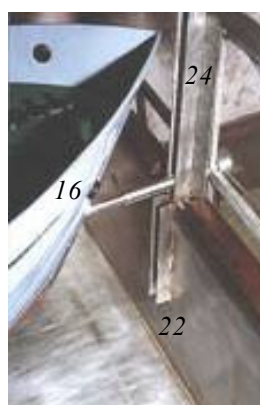


Рис. 7. Стрижні моделі (16, 17) для її поздовжньої орієнтації у резервуарі (22, 23 – направляючі резервуара для орієнтації моделі, 24 – опора розбірного інклінометра великих кутів крену моделі)

Резервуар для заборотної води 18 розмірами 1,80×0,85×0,30 м із нержавіючої сталі (рис. 8), що включає в себе:

дві легкі підставки з нержавіючої сталі 19 висотою 0,40 м із регулювальними гвинтами горизонтального положення резервуара;

систему подачі 20 і зливу 21 заборотної води;

кріплення 22, 23 для орієнтації моделі в резервуарі з заборотною водою;

опору 24 для орієнтації й кріплення розбірного інклінометра великих кутів крену моделі (див. рис. 7).

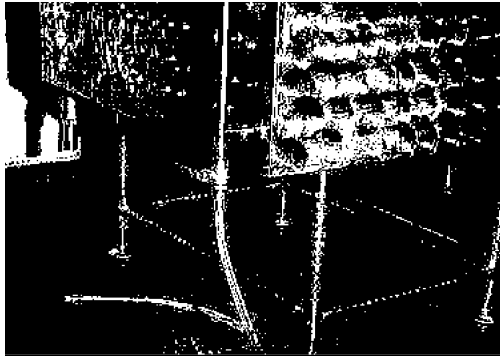


Рис. 8. Система подачі 20 і зливу 21 заборотної води
(18 – резервуар для заборотної води, 19 – легка підставка з регулювальними гвинтами)

Схему розміщення механічного устаткування моделі наведено на рис. 9 (цифри відповідають вказаним на рис. 2–7).

Електрична система виміру характеристик посадки моделі та її нахилів (рис. 10) включає в себе:

датчик тиску заборотної води 5 для визначення осадки моделі;

гіроскопічний інклінометр (гіроскоп) 6 для виміру кутів крену й диференту (гіроскоп має: генератор змінної напруги 400 Гц, блок живлення, датчики кутів крену й диференту);

блок живлення від електричної мережі 220 В для осадкоміра, гіроскопічного інклінометра й насосів внутрішніх цистерн моделі.

Конвертер електричних сигналів датчика тиску заборотної води і гіроскопа в цифрові сигнали ПК 25 (див. рис. 10) включає в себе:

систему переключення і перетворення електричних сигналів датчиків гіроскопа й тиску в сигнали для ПК з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП), яка містить: світлодіодний пристрій переключення каналів

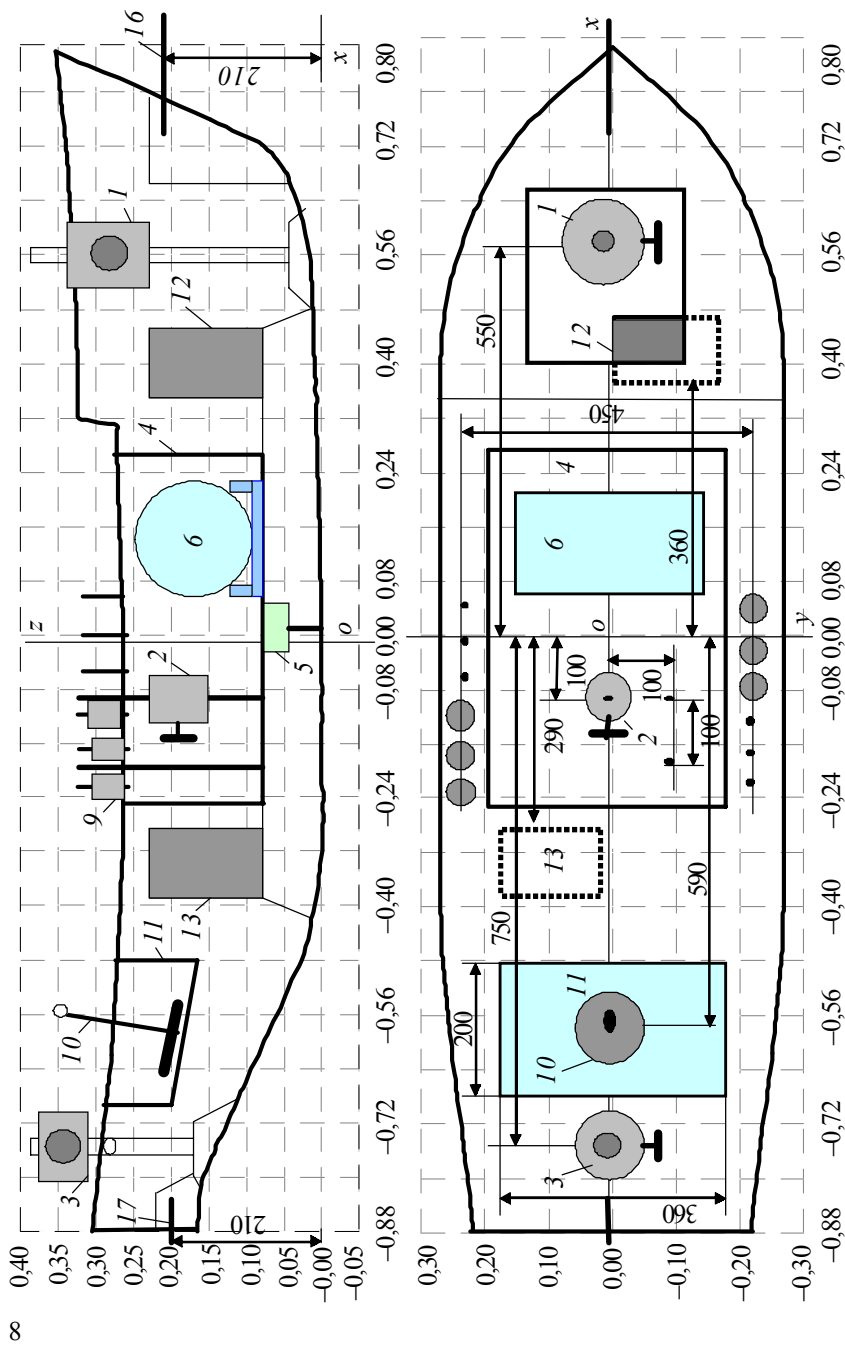


Рис. 9. Схема розміщення механічного обладнання на моделі

датчиків, частотний конвертер електричних сигналів датчика тиску, конвертер знаків датчиків гіроскопа;

аналого-цифровий перетворювач електричних сигналів звукових частот типу "SoundBlaster".

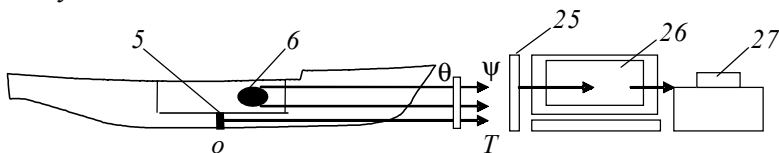


Рис. 10. Схема визначення параметрів посадки судна за допомогою осадкоміра, гіроскопічного інклінометра і ПК

Обчислювальний комплекс на основі ПК 26 (рис. 11) включає в себе ПК із даними, не гіршими, чим параметри комп'ютера IBM PC/AT – 486, і можливістю розміщення АЦП типу "SoundBlaster", програмне забезпечення для ПК на дискетах. Записувальні пристрої ПК – це його стандартні пристрої: дисковод і принтер 27 (див. рис. 11).



Рис. 11. Комп'ютерний комплекс установки з блоком живлення моделі, датчиків посадки й насосів цистерн:

1 – монітор; 2 – системний блок із "SoundBlaster"; 3 – принтер; 4 – клавіатура;
5 – миша; 6 – блок живлення моделі, датчиків посадки й насосів бортових цистерн

Методичні інструкції до виконання лабораторних робіт містять описи 12 лабораторних робіт, виконаних за схемою: мета лабораторної роботи; короткий опис теоретичних і практичних положень досліджуваної проблеми; опис лабораторної установки та її комплектації для реалізації даної лабораторної роботи; послідовність виконання роботи; розрахункові формули й таблиці; контрольний приклад.

Розділ 2. ПЛАВУЧІСТЬ, ОСТІЙНІСТЬ І НЕПОТОПЛЮВАНІСТЬ СУДНА

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОСАДКИ СУДНА

Мета роботи – визначення характеристик положення судна відносно вільної поверхні рідини.

1. Теоретичні відомості

1.1. Система координат, жорстко пов'язана з судном

Для визначення геометрії форми корпусу судна і його положення відносно вільної поверхні рідини вводиться жорстко пов'язана з ним ліва система координат (рис. 1.1). Початок цієї системи координат – точка o – розташовується в точці перетину горизонтальної площини (основної

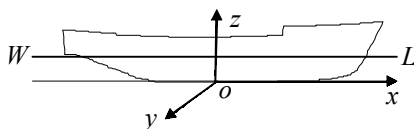


Рис. 1.1. Система координат

площини), площини середнього поперечного перерізу корпусу судна (площини мідель-шпангоута) і площини його поздовжньої симетрії (діаметральної площини). Вісь ox направляється вперед, будучи лінією перетину діаметральної й основної площин, вісь oy утворюється перетином площини мідель-шпангоута й основної площини, її напрямком на правий борт є позитивним, вісь oz – лінія перетину діаметральної площини і площини мідель-шпангоута, її напрямком угору вважається позитивним.

Таким чином, площина hox є основною, площина hoz – діаметральною, а hoy – площиною мідель-шпангоута.

1.2. Параметри, що визначають посадку судна

У загальному випадку площина діючої ватерлінії не рівнобіжна основній площині. Це так званий випадок посадки судна по "довільну ватерлінію". Положення "довільної ватерлінії" в обраній системі координат визначається наступними параметрами (рис. 1.2):

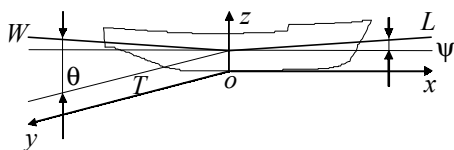


Рис. 1.2. Параметри посадки судна

осадкою T – висотою точки перетину площини "довільної ва-

терлінії" з віссю oz ; кутом диференту ψ – кутом між віссю ox і слідом ватерлінії на площині xoz ; кутом крену θ – кутом між віссю oy і слідом ватерлінії на площині $yo z$.

1.3. Випадки посадки судна

Розглянутий випадок посадки судна по "довільну ватерлінію" є найбільш загальним. Якщо кут крену дорівнює нулю, це означає, що судно сидить без крену (прямо); якщо кут диференту дорівнює нулю – судно сидить без диференту (на рівний киль); судно сидить прямо і на рівний киль, якщо дорівнюють нулю кути крену і диференту.

1.4. Способи визначення посадки судна

Визначення посадки судна за допомогою марок заглиблення. Розташування марок заглиблення (марок осадки) на судні показано на рис. 1.3.

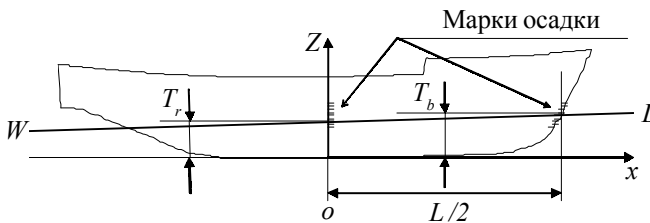


Рис. 1.3. Визначення параметрів посадки судна

При відомих заглибленнях (осадках) правого T_r і лівого бортів T_l , що спостерігаються в площині мідель-шпангоута, осадка судна визначається за формулою

$$T = (T_r + T_l) / 2.$$

За допомогою цих же осадок визначається кут крену судна:

$$\theta = \arctg ((T_l - T_r) / B),$$

де B – ширина судна; $\theta = \theta \cdot 57,3$ град.

Заглиблення (осадки) корми T_a і носа T_b дозволяють визначити кут диференту судна:

$$\psi = \arctg ((T_b - T_a) / L),$$

де L – довжина між перпендикулярами; $\psi = \psi \cdot 57,3$ град.

Якщо осадка кормою не може бути визначена, кут диференту обчислюється за формулою

$$\psi = \arctg ((T_b - T) / (L/2 - x_F)),$$

де x_F – абсциса центра ваги площі ватерлінії.

У першому наближенні величина x_F може бути покладена рівною нулю. В другому наближенні ця величина визначається на основі даних, що наводяться в лабораторній роботі № 2.

В усіх поперечних перерізах судна слід ватерлінії утворює той самий кут крену θ , що і слід ватерлінії на площині $yo\bar{z}$. Координата точки перетину сліду ватерлінії з вертикальною віссю в довільному поперечному перерізі визначається виразом

$$T_i = T + x_i \operatorname{tg} \psi.$$

Тут x_i – відстань від даного поперечного переріза судна до площини мідель-шпангоута. Для носових перетинів $x_i > 0$ і для кормових $x_i < 0$.

Визначення посадки судна за допомогою датчиків осадки, кутів крену і диференту. Датчик осадки судна 1 (рис. 1.4) розташовується біля початку координат системи $ox\bar{y}z$. Це звичайний датчик тиску. Координати вхідного отвору датчика: $x_g = 0,120$ м; $y_g = 0,000$ м і $z_g = 0,000$ м. Датчик вимірює тиск рідини у цій точці в міліметрах водяного стовпа і при малих кутах крену та диференту досить точно визначає значення осадки судна T . Кут крену θ і диференту ψ судна вимірюються за допомогою гіроскопічного інклінометра 2. Електричні сигнали датчиків осадки, кутів крену і диференту перетворюються в цифрові за допомогою аналого-цифрового перетворювача 3. Цифрові значення параметрів посадки реєструються персональним комп'ютером 4, виводяться на його екран і фіксуються як протокол експериментальних досліджень на принтері 5.

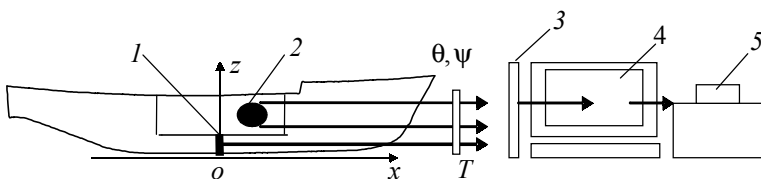


Рис. 1.4. Визначення параметрів посадки судна за допомогою датчика осадки, гіроскопічного інклінометра і персонального комп'ютера

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

2.1. Установка в цілому

Повний склад експериментальної установки наведений у розділі "Опис експериментальної установки".

2.2. Вузли, що використовуються при виконанні даної лабораторної роботи: переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика осадки та гіроскопічного інклінометра; датчики осадки і кутів нахилу моделі; ПК з аналого-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

3. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою та її описом. Вивчити способи визначення посадки судна. Включити блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра (почекати п'ять хвилин для забезпечення стабілізації режиму роботи датчиків). Включити ПК, запустити програму "Експериментальні виміри". В меню програми натиснути кнопку "Виміри" і переглянути інформацію обчислювального комплексу з визначення осадки, кутів крену і диференту судна. Встановити положення судна "Прямо і на рівний кіль" за допомогою переміщення переносних і регулювальних вантажів. Виконати регулювання і калібрування показань датчика осадки і гіроскопічного інклінометра (див. розд. "Інструкція до роботи з ПК"). Переміщенням рухливих вантажів на судні одержати "довільну ватерлінію". Визначити величини параметрів посадки судна по цю ватерлінію за допомогою марок заглиблення і наведених вище формул. Виконавши необхідні виміри й обчислення, скласти протоколи. Дані про параметри посадки судна, представлені на екрані ПК, додати до протоколу автоматизованих експериментальних досліджень. Оформити звіт про роботу, в якому порівняти результати, отримані двома способами визначення посадки судна.

4. Обробка результатів

За допомогою виміряних за марками заглиблень осадок лівого і правого бортів судна, а також осадки носом визначити осадку, кути крену і

диференту судна. Визначити ті ж параметри посадки судна за допомогою датчиків параметрів посадки й обчислювального комплексу. Порівняти величини, отримані в результаті візуальних спостережень за посадкою судна, з даними, що представлені обчислювальним комплексом. Сформулювати висновки до лабораторної роботи (ЛР).

Контрольні запитання

1. Яким чином система координат пов'язується з судном?
2. Для чого призначена система координат?
3. Що називається посадкою судна? Якими параметрами визначається посадка судна?
4. Які випадки посадки судна вам відомі?
5. Якими способами визначається посадка судна?

ПРИКЛАД оформлення лабораторної роботи. Протокол експериментальних досліджень

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОСАДКИ СУДНА

Протокол вимірів і обчислень

Дата 14.05.01, час 08.10

1. Головні розміри судна (див. рис. 2.1 лабораторної роботи № 2): ширина судна $B = 0,540$ м, половина довжини між перпендикулярами $L / 2 = 0,780$ м, абсциса центра ваги площі ватерлінії $x_F = 0,000$ м.

А. Посадка судна "Прямо і на рівний киль"

2. Визначення параметрів посадки судна за допомогою марок осадки.

Візуальні виміри параметрів осадки судна: осадка лівого борта судна $T_l = 144$ мм; осадка правого борта судна $T_r = 144$ мм; осадка носом $T_b = 144$ мм.

Обчислення: осадка судна $T = (T_l + T_r) / 2 = 144$ мм; кут крену $\theta = (\arctg((T_l - T_r) / B)) \cdot 57,3 = 0,000$ град; кут диференту $\psi = (\arctg((T_b - T) / (L/2 - x_F))) \cdot 57,3 = 0,000$ град.

3. Визначення посадки судна за допомогою датчиків осадки і гіроскопічного інклінометра.

Показання датчиків: осадка судна $T = 144,02$ мм; кут крену $\theta = 0,034$ град; кут диференту $\psi = 0,012$ град.

В. Посадка судна по "Довільну ватерлінію"

4. Визначення параметрів посадки судна за допомогою марок осадки.

Візуальні виміри значень осадки судна: осадка лівого борта судна $T_l = 152$ мм; осадка правого борта судна $T_r = 134$ мм; осадка носом $T_b = 128$ мм.

Обчислення: осадка судна $T = (T_l + T_r) / 2 = 143$ мм; кут крену $\theta = (\arctg((T_l - T_r) / B)) \cdot 57,3 = 1,909$ град; кут диференту $\psi = (\arctg((T_b - T) / (L/2 - x_F))) \cdot 57,3 = -1,101$ град.

5. Визначення посадки судна за допомогою датчиків осадки, кутів крену і диференту.

Показання датчиків

Відносна похибка, %

Кут крену $\theta = 1,918$ град

$(1,909 - 1,918) / 1,918 = -0,46$

Кут диференту $\psi = -1,121$ град

$(-1,101 + 1,121) / 1,121 = 1,75$

Кут крену $\theta = 0,0335$ рад

Кут диференту $\psi = -0,0196$ рад

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАНУРЕНОГО ОБ'ЄМУ КОРПУСА СУДНА ПРИ ПОСАДЦІ ПРЯМО І НА РІВНИЙ КІЛЬ

Мета роботи – набуття навичок у роботі з технічною документацією судна.

1. Теоретичні відомості

1.1. Технічна документація судна

До основних складових технічної документації судна відносять "Теоретичне креслення" та "Криві елементів теоретичного креслення" ("Гідростатичні криві").

Теоретичним кресленням називається сукупність проєкцій ліній перетинання теоретичної поверхні корпусу судна площинами, рівнобіжними координатним площинам пов'язаної з судном системи координат *оxyz*, на площини цієї системи. Зв'язок координатних площин системи *оxyz* із судном обумовлює їх назва як основної площини, площини мідель-шпангоута і діаметральної площини. Представлені на них сукупності проєкцій ліній перетинання теоретичної поверхні корпусу судна мають назву "На-

півширота", "Корпус" і "Бік", а лінії перетинання – ватерлінії, шпангоути і батокси.

На рис. 2.1 проекція "Корпус" теоретичного креслення представлена в цілому, а проекція "Бік" – тільки діаметральним батоксом.

Головні розміри судна. Судно проектується для найбільш частот експлуатації по так звану головну (ГВЛ) чи конструктивну (КВЛ) ватерлінії. Тому розміри об'єму корпусу судна по цю ватерлінію називаються головними розмірами. До них відносять:

L – довжину між перпендикулярами, чи довжину судна по ГВЛ;

B – ширину судна, чи ширину судна по ГВЛ;

T – осадку судна, чи осадку судна по ГВЛ.

Для характеристики величини всього об'єму корпусу судна використовується параметр H – висота борта. Під висотою борта мається на увазі відстань від кіля до верхньої водонепроникної палуби, що обмірюється на проекції "Бік" у перетині мідель-шпангоута. Для визначення габаритних розмірів корпусу судна вводяться позначення $L_{\max}$, $B_{\max}$ і $H_{\max}$. Символ T також використовується для позначення довільної осадки судна (див. ЛР № 1). Для габаритних розмірів ватерлінії при довільній осадці T вводяться позначення $L(T)$, $B(T)$.

"Елементи теоретичного креслення" і "Криві елементів теоретичного креслення". При посадці судна "Прямо і на рівний кіль" площини перетинання теоретичної поверхні корпусу судна, рівнобіжні основній площині, збігаються з площинами незбуреної вільної поверхні рідини при різних середніх осадках судна T . Сукупність цих площин утворює залежність характеристик зануреного об'єму корпусу судна від осадки. Графічне зображення таких залежностей називають "Кривими елементів теоретичного креслення" (рис. 2.2).

Частину цих залежностей також одержують при інтегруванні гідростатичного тиску за змоченою поверхнею корпусу судна. Тому для "Кривих елементів теоретичного креслення" використовується інша назва – "Гідростатичні криві".

До елементів теоретичного креслення чи елементів зануреного об'єму корпусу судна при посадці "Прямо і на рівний кіль" відносять:

V – занурений об'єм корпусу судна (об'ємна водотоннажність);

x_C, y_C, z_C – координати центра ваги зануреного об'єму – координати точки C (координати центра величини);

$D = \rho g V$ кН – модуль сили плавучості (вагова водотоннажність), де ρ – щільність води ($1,0 \text{ т/м}^3$ – прісна; $1,025 \text{ т/м}^3$ – солонa вода);

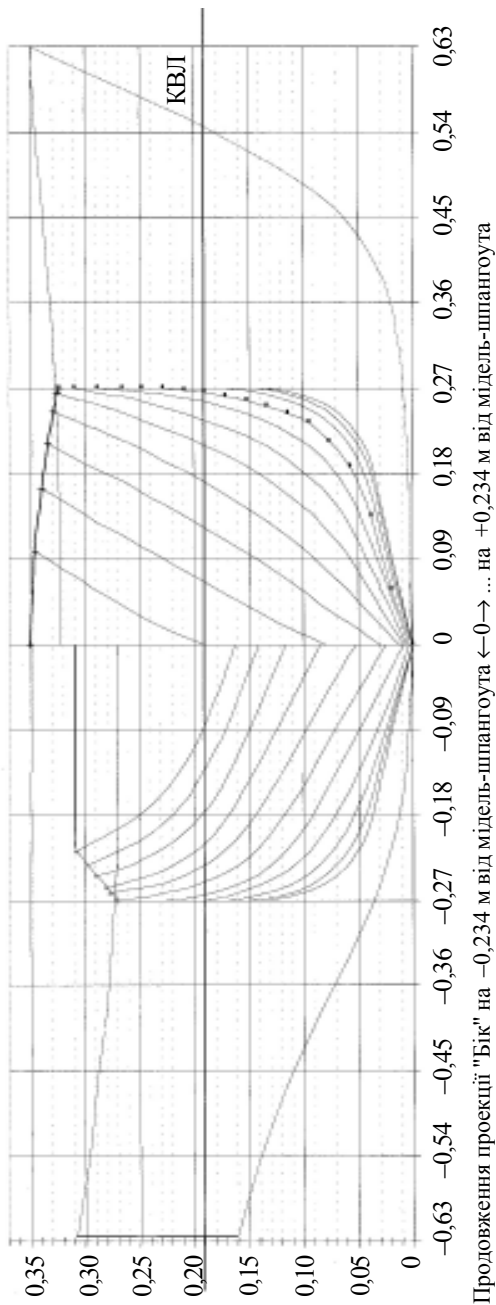


Рис. 2.1. Теоретичне креслення моделі судна "Арія"

(довжина моделі – 1,73 м; довжина між перпендикулярами – 1,56 м; ширина – 0,54 м; висота борту – 0,26 м; осадка по КВЛ – 0,19 м; об'ємна водотоннажність при осадці по КВЛ – 0,0831 м³)

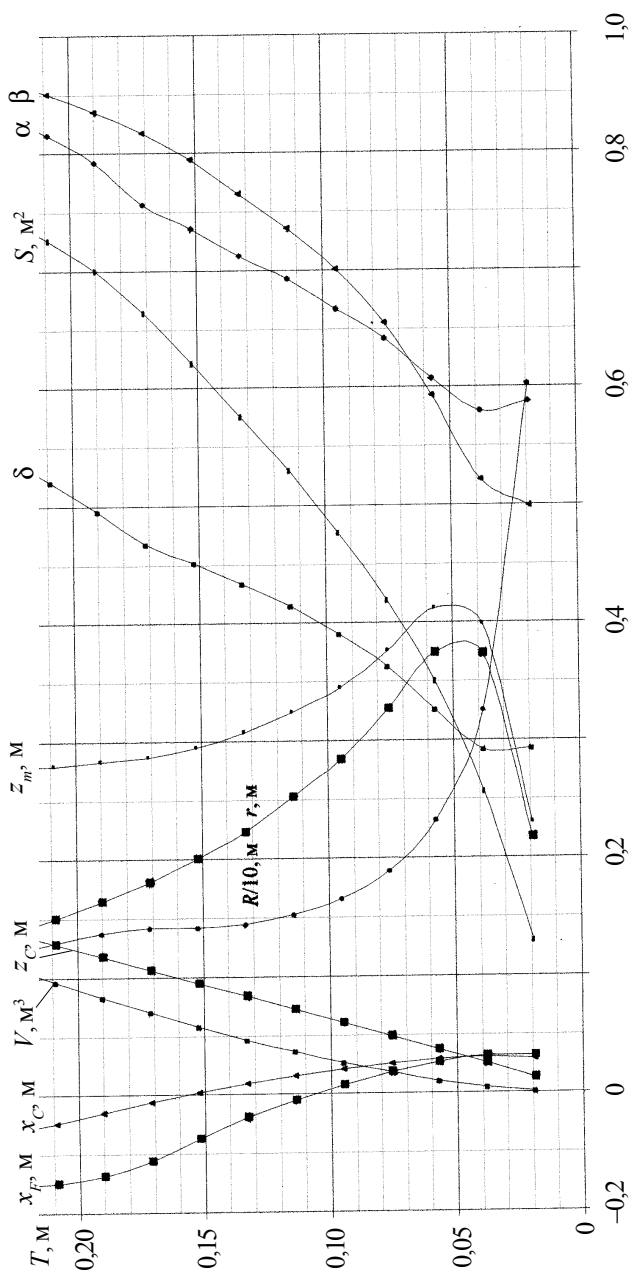


Рис. 2.2. Криві елементів теоретичного креслення моделі судна "Арія"

g – прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$);

S – площа ватерлінії;

x_F, y_F – координати центра ваги площі ватерлінії – координати точки F ;

I_x – центральний момент інерції площі ватерлінії, обчислений відносно поздовжньої осі, що проходить через точку F ;

I_F – центральний момент інерції площі ватерлінії, обчислений відносно поперечної осі, що проходить через точку F ;

$r = \frac{I_x}{V}$ – поперечний метацентричний радіус – радіус кривизни кривої, що утворена точкою C при нахилах судна у поперечній площині;

$R = \frac{I_F}{V}$ – поздовжній метацентричний радіус – радіус кривизни кривої, що утворена точкою C при нахилах судна у поздовжній площині;

$\alpha = \frac{S}{LB}$ – коефіцієнт повноти площі ватерлінії S ;

$\beta = \frac{\omega}{BT}$ – коефіцієнт повноти зануреної площі мідель-шпангоута ω ;

$\delta = \frac{V}{LBT}$ – коефіцієнт загальної повноти – коефіцієнт повноти зануреного об'єму V .

У цих формулах $L = L(T)$ і $B = B(T)$ – найбільша довжина і ширина об'єму V , T – осадка.

Рівняння теоретичної поверхні корпусу судна зазвичай задається у вигляді

$$y - f(x, z) = 0 \text{ або } y = f(x, z).$$

Тому елементи теоретичного креслення (елементи зануреного об'єму корпусу судна при посадці прямо і на рівний кіль) визначаються формулами

$$S(T) = 2 \int_L f(x, T) dx; \quad x_F(T) = \frac{2}{S} \int_L x f(x, T) dx; \quad y_F(T) = 0;$$

$$\omega(0, T) = 2 \int_0^T f(0, z) dz; \quad I_x(T) = \frac{2}{3} \int_L f^3(x, T) dx; \quad I_F(T) = 2 \int_L x^2 f(x, T) dx;$$

$$V(T) \int_0^T S(z) dz; \quad x_C(T) = \frac{1}{V} \int_L x \omega(x, T) dx; \quad y_C(T) = 0;$$

$$z_C(T) = \int_0^T z S(z) dz; \quad r(T) = \frac{I_x(T)}{V(T)}; \quad R(T) = \frac{I_F(T)}{V(T)};$$

$$\alpha(T) = \frac{S(T)}{L(T)B(T)}; \quad \beta(T) = \frac{\omega(T)}{B(T)T}; \quad \delta(T) = \frac{V(T)}{L(T)B(T)T}.$$

За допомогою цих формул будуються залежності елементів зануреного об'єму корпусу судна від осадки, які представлені на рис. 2.2. Числові значення залежностей наведені у таблиці.

За формулами, подібними наведеним, обчислюються елементи зануреного об'єму корпусу судна й при його посадці по довільну ВЛ.

2. Практичні вказівки

Якщо судно сидить прямо і на рівний киль та в який-небудь спосіб визначено його осадку T (див. ЛР № 1), то об'єм зануреної частини корпусу судна V визначається за допомогою кривих елементів теоретичного креслення таким чином. На осі значень осадки відшукується потрібне значення осадки T , а на осі значень зануреного об'єму знаходиться відповідне значення V (рис. 2.3). Аналогічне значення об'єму знаходиться за допомогою табл. 2.1 шляхом інтерполяції.

Аналогічним способом знаходяться значення будь-якого іншого елемента теоретичного креслення.

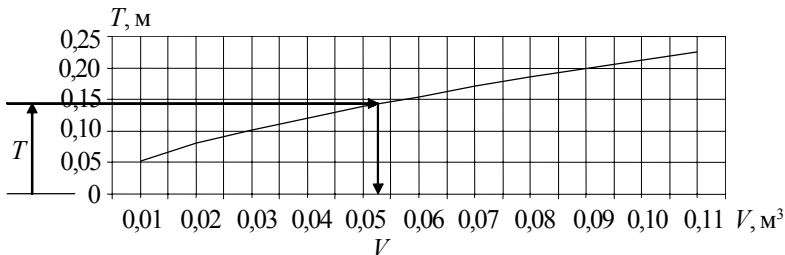


Рис. 2.3. Визначення характеристик зануреного об'єму корпусу судна за допомогою "Кривих елементів теоретичного креслення"

Таблиця. 2.1. Числові значення елементів теоретичного креслення

№ п/п	Еле- мент	Одини- ця	Осадка моделі, м														
			0,000	0,019	0,038	0,057	0,076	0,095	0,114	0,133	0,152	0,171	0,190	0,209	0,228	0,247	
1	V	м ³	0,0000	0,0012	0,0049	0,0107	0,0180	0,0265	0,0361	0,0466	0,0579	0,0701	0,0831	0,0968	0,1109	0,1254	
2	x_C	м	0,0000	0,0293	0,0312	0,0291	0,0260	0,0215	0,0161	0,0097	0,0022	-0,006	-0,015	-0,024	-0,031	-0,037	
3	z_C	м	0,0000	0,0126	0,0253	0,0375	0,0492	0,0608	0,0722	0,0836	0,0949	0,1063	0,1177	0,1291	0,1403	0,1515	
4	r	м	0,0000	0,2177	0,3738	0,3748	0,3267	0,2838	0,2524	0,2232	0,2001	0,1804	0,1649	0,1506	0,1387	0,1280	
5	R	м	0,0000	6,0288	3,2631	2,3259	1,8946	1,6600	1,5332	1,4479	1,4226	1,4225	1,3790	1,2986	1,2175	1,1354	
6	x_F	м	0,0000	0,0317	0,0316	0,0266	0,0186	0,0076	-0,005	-0,019	-0,037	-0,056	-0,069	-0,075	-0,077	-0,075	
7	z_m	м	0,0000	0,2303	0,3991	0,4124	0,3760	0,3446	0,3246	0,3068	0,2950	0,2868	0,2827	0,2797	0,2791	0,2795	
8	S	м ²	0,0000	0,1299	0,2559	0,3499	0,4189	0,4763	0,5297	0,5754	0,6209	0,6642	0,7002	0,7262	0,7483	0,7658	
9	α	—	0,0000	0,5882	0,5801	0,6075	0,6417	0,6668	0,6932	0,7123	0,7357	0,7563	0,7920	0,8161	0,8355	0,8496	
10	δ	—	0,0000	0,2930	0,2923	0,3260	0,3632	0,3910	0,4144	0,4336	0,4518	0,4673	0,4952	0,5205	0,5432	0,5634	
11	β	—	0,0000	0,4993	0,5213	0,5932	0,6555	0,7005	0,7356	0,7655	0,7947	0,8174	0,8357	0,8506	0,8630	0,8735	
12	B_{wl}	м	0,0000	0,2074	0,3820	0,4664	0,5021	0,5221	0,5340	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	0,5400	
13	L_{wl}	м	0,8620	1,0644	1,1550	1,2349	1,3001	1,3681	1,4310	1,4960	1,5630	1,6263	1,6372	1,6478	1,6585	1,6692	

3. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

3.1. Установка в цілому

Повний склад експериментальної установки наведено в розд. 1.

3.2. Вузли, що використовуються при виконанні даної лабораторної роботи: переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики осадки і кутів нахилення моделі; ПЕОМ з аналогово-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

4. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою та її описом. Вивчити способи визначення посадки судна. Переміщенням рухомих вантажів на судні одержати посадку прямо і на рівний киль. Обчислити значення осадки за допомогою марок заглиблення, зафіксувати його в протоколі експериментальних досліджень. Увімкнути блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра. Зачекати п'ять хвилин для забезпечення стабілізації режиму роботи датчиків. Увімкнути ПК, запустити програму "Експериментальні виміри". У Головному меню програми натиснути кнопку "Измерения" і переглянути інформацію обчислювального комплексу з визначення осадки, кутів крену і диференту судна. Дані про параметри посадки судна, представлені на екрані ПК, додати до протоколу автоматизованих експериментальних досліджень. Взяти документацію судна – "Теоретичне креслення" і "Криві елементів теоретичного креслення" (див. рис. 2.1 і 2.3), на яких зафіксувати значення осадки і зняти значення елементів теоретичного креслення, занести їх до протоколу експериментальних досліджень. Оформити звіт про роботу.

5. Обробка результатів

За допомогою марок заглиблень лівого і правого бортів судна, а також осадки носом визначити осадку, кути крену й диференту судна. Визначити ті ж параметри посадки судна за допомогою датчиків параметрів посадки й обчислювального комплексу. Зробити порівняння величин, отриманих у результаті візуальних спостережень за посадкою судна, з даними, що представлені обчислювальним комплексом. За допомогою даних про осадку судна і графіка (див. рис. 2.3) визначити елементи зану-

реного об'єму корпусу судна. Визначити ті ж параметри за допомогою будь-якої доступної обчислювальної програми. Зробити порівняння величин, отриманих за допомогою "Кривих елементів теоретичного креслення", з даними, представленими обчислювальною програмою. Сформулювати висновки до лабораторної роботи.

Контрольні запитання.

1. Що називається теоретичним кресленням (ТК) судна?
2. Як називаються лінії перетину теоретичної поверхні корпусу судна з площинами, рівнобіжними координатним площинам системи координат, пов'язаної з судном?
3. Як називаються сукупності проекцій цих ліній на координатні площини системи координат, пов'язаної з судном?
4. Як у зв'язку з цим називаються самі координатні площини?
5. Які величини називаються головними елементами судна?
6. Що відносять до габаритних розмірів корпусу судна?
7. Що називається елементами теоретичного креслення (ЕТК)?
8. За якими формулами вони обчислюються?
9. Що називається кривими елементів теоретичного креслення?
10. Чому вони також називаються гідростатичними кривими?
11. Яким способом визначаються ЕТК за допомогою кривих елементів теоретичного креслення і даних про посадку судна?

ПРИКЛАД оформлення лабораторної роботи

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАНУРЕНОГО ОБ'ЄМУ

Протокол вимірів і обчислень

Дата 15.05.01, час 08.10

1. Посадка судна: прямо і на рівний киль.

1.1. Визначення параметрів посадки за допомогою марок осадки.

Візуальне визначення величин параметрів посадки: осадка лівого борта судна $T_l = 144$ мм; осадка правого борта судна $T_r = 144$ мм; осадка носом $T_b = 144$ мм.

Обчислення: осадка судна $T = (T_l + T_r)/2 = 144$ мм; кут крену $\theta = (\arctg((T_l - T_r) / B)) \cdot 57,3 = 0,000$ град; кут диференту $\psi = (\arctg((T_b - T)/(L/2 - xF))) \cdot 57,3 = 0,000$ град.

1.2. Визначення посадки судна за допомогою датчиків осадки і гіроскопічного інклінометра.

Показання датчиків: осадка судна $T = 144,02$ мм; кут крену $\theta = 0,034$ град; кут диференту $\psi = 0,012$ град.

2. Головні розміри судна

За даними, що представлені на рис. 2.2., формується табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Головні розміри судна, м

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Значення
1	Довжина	$L_{\max}$	1,690
2	Довжина між перпендикулярами	L	1,560
3	Ширина	B	0,540
4	Осадка	T	0,140
5	Висота борту	H	0,260

3. Елементи теоретичного креслення

За допомогою кривих елементів теоретичного креслення (див. рис. 2.2) та інтерполяції даних, представлених у табл. 2.1, визначаються величини характеристик зануреного об'єму судна (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Елементи теоретичного креслення

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Занурений об'єм корпусу судна (об'ємна водотоннажність)	V	м ³	0,0508
2	Координати центра ваги зануреного об'єму (координати центра величини)			
3	Абсциса центра величини	x_C	м	0,0070
4	Ордината центра величини	y_C	м	0,0000
5	Апліката центра величини	z_C	м	0,0878
6	Модуль сили плавучості (вагова водотоннажність)	$D = \rho q V$	Н	569,0
7	Щільність води	ρ	кг/м ³	1000
8	Прискорення земного тяжіння	g	м/с ²	9,810
9	Площа ватерлінії	S	м ²	0,6021

Продовж. табл. 2.2

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
9	Координати центра ваги площі ВЛ			
10	Абсциса	x_F	м	-0,0256
11	Ордината	y_F	м	0,0000
12	Поперечний метацентричний радіус	r	м	0,2147
13	Поздовжній метацентричний радіус	R	м	1,4387
14	Коефіцієнт повноти площі ватерлінії	α		0,7209
15	Коефіцієнт повноти площі М-Ш	β		0,6021
16	Коефіцієнт загальної повноти – коефіцієнт повноти зануреного об'єму	δ		0,4409

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РІВНОВАГИ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ

Мета роботи – вивчення умов рівноваги судна на тихій воді.

1. Теоретичні відомості

1.1. Сили і моменти, що діють на судно

У положенні рівноваги на тихій воді на судно діє сила ваги $\mathbf{D} = Mg$ (модуль якої $D = Mg$, де M – маса судна, g – абсолютна величина прискорення земного тяжіння) і сила плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$, де V – об'єм зануреної частини корпусу судна.

Сила ваги судна $\mathbf{D}$ діє вертикально вниз по лінії, що проходить через центр ваги судна (центр маси судна) – точку G , координати якої в системі координат $oxyz$, пов'язаної з судном, позначаються через x_G, y_G і z_G . Для проєкцій сили ваги $\mathbf{D}$ на осі системи координат $oxyz$ вводяться позначення $[D]_x, [D]_y, [D]_z$.

Архімедова сила – сила плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$ діє вертикально вгору, проходячи через точку C – центр ваги зануреного об'єму корпусу судна. Координатами точки C , як відомо, є величини x_C, y_C і z_C . Проєкції сили плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$ на осі системи координат $oxyz$ позначаються виразами $[\rho gV]_x, [\rho gV]_y, [\rho gV]_z$.

Відносно початку координат – точки O сила ваги і сила плавучості утворюють моменти $\mathbf{M}_D$ і $\mathbf{M}_V$, проекціями яких на осі системи координат $Oxuz$ є величини $[M_D]_x$, $[M_D]_y$, $[M_D]_z$, і $[M_V]_x$, $[M_V]_y$, $[M_V]_z$ відповідно. Статичні моменти M_{Myoz} , M_{Mzox} , і M_{Mxoy} маси судна M щодо площин yoz , zox , xoy системи координат, пов'язаної з судном, визначаються виразами

$$M_{Myoz} = Mx_G; \quad M_{Mzox} = My_G; \quad M_{Mxoy} = Mz_G.$$

Для статичних моментів зануреного об'єму корпусу судна V щодо площин yoz , zox і xoy системи координат $Oxuz$ вводяться позначення M_{Vyoz} , M_{Vzox} і M_{Vxoy} . Ці моменти обчислюються за формулами

$$M_{Vyoz} = Vx_C; \quad M_{Vzox} = Vy_C; \quad M_{Vxoy} = Vz_C. \quad (3.1)$$

Маса судна та її статичні моменти. Якщо відоме вагове навантаження судна, то його сила ваги $\mathbf{D} = M\mathbf{g}$ утвориться підсумовуванням сил ваги $\mathbf{p}_j = m_j \mathbf{g}$ окремих частин корпусу, механізмів, пристроїв, устаткування і вантажів, розміщених на судні:

$$\mathbf{D} = \sum_{j=1}^N \mathbf{p} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{g} = M\mathbf{g}.$$

Тут m_j – маса j -ї частини вагового навантаження судна.

У цьому випадку координати центра ваги (центра маси) судна визначаються за допомогою статичних моментів $m_j x_j$, $m_j y_j$, $m_j z_j$ мас m_j , що обчислені відносно площин yoz , zox і xoy за формулами

$$x_G = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N m_j x_j; \quad y_G = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N m_j y_j; \quad z_G = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N m_j z_j,$$

де x_j , y_j , і z_j – координати центрів мас m_j частин вагового навантаження судна у системі координат $Oxuz$.

Сила плавучості та її моменти. У кожній точці E зануреної у воду поверхні корпусу судна Σ діє надлишковий гідростатичний тиск $p - p_0$, що визначається за формулою

$$p - p_0 = -\rho g Z,$$

де p_0 – атмосферний тиск; Z – координата розглянутої точки суднової поверхні в абсолютній системі координат $OXYZ$, площа якої OXY співпа-

дає з площиною незбуреної поверхні рідини, а вісь OZ спрямована вертикально вгору.

Зв'язок між системами координат $OXYZ$ і $oxyz$ обумовлює існування наступного співвідношення:

$$Z = \zeta - x \sin \psi - y \sin \theta \cos \psi + z \cos \theta \cos \psi,$$

де ζ – заглиблення точки o системи $oxyz$ під вільну поверхню рідини.

Викликана тиском $p - p_0$ елементарна сила, що діє на елементарну площадку $d\sigma$, розташовану в околиці точки E , за абсолютною величиною дорівнює $(p - p_0)d\sigma$ і спрямована протилежно зовнішній нормалі $\mathbf{n}$ до поверхні Σ . У зв'язку з цим проекції сили плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$ і момента сили плавучості $\mathbf{M}_V$ на осі ox , oy і oz системи координат $oxyz$ визначаються наступними виразами:

$$[\rho g V]_x = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) \cos(n, x) d\sigma; \quad [\rho g V]_y = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) \cos(n, y) d\sigma;$$

$$[\rho g V]_z = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) \cos(n, z) d\sigma;$$

$$[M_V]_x = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) [y \cos(n, z) - z \cos(n, y)] d\sigma;$$

$$[M_V]_y = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) [z \cos(n, x) - x \cos(n, z)] d\sigma;$$

$$[M_V]_z = - \int_{\Sigma} \int (p - p_0) [x \cos(n, y) - y \cos(n, x)] d\sigma.$$

Переходячи у наведених формулах від інтегралів по змоченій поверхні корпусу судна Σ до інтегралів по об'єму V , одержимо:

$$[\rho g V]_x = -\rho g V \sin \psi; \quad [\rho g V]_y = -\rho g V \sin \theta \cos \psi; \quad [\rho g V]_z = \rho g V \cos \theta \cos \psi;$$

$$[M_V]_x = \rho g [M_{V_{zox}} \cos \theta \cos \psi + M_{V_{xoy}} \sin \theta \cos \psi];$$

$$[M_V]_y = \rho g [-M_{V_{xoy}} \sin \psi - M_{V_{yoz}} \cos \theta \cos \psi];$$

$$[M_V]_z = \rho g [-M_{V_{yoz}} \sin \theta \cos \psi + M_{V_{zox}} \sin \psi],$$

де статичні моменти $M_{V_{yoz}}$, $M_{V_{zox}}$ і $M_{V_{xoy}}$ зануреного об'єму корпусу судна V , обчислені щодо площин yoz , zox і xoy системи координат $oxyz$, визначаються співвідношеннями (3.1).

1.2. Умови рівноваги

Умовами рівноваги судна на тихій воді є рівність нулю суми всіх діючих сил і рівність нулю суми всіх моментів цих сил:

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k \equiv \mathbf{D} + \rho V(-\mathbf{g}) = 0; \quad \sum_{k=1}^K \mathbf{M}_k \equiv \mathbf{M}_D + \mathbf{M}_V = 0.$$

Вони означають, що розглянуті сили діють по вертикалі, що перпендикулярна площині діючої ВЛ і проходить через точки G і C .

У системі координат $oxyz$, жорстко пов'язаної з судном, рівняння площини діючої ватерлінії записується у вигляді

$$x \operatorname{tg} \psi + y \operatorname{tg} \theta - z + T = 0, \quad (3.2)$$

а умовою перпендикулярності лінії дії сил і площини ватерлінії є співвідношення

$$\frac{x_C - x_G}{\operatorname{tg} \psi} = \frac{y_C - y_G}{\operatorname{tg} \theta} = \frac{z_C - z_G}{1}, \quad (3.3)$$

де величини $x_C - x_G$, $y_C - y_G$ та $z_C - z_G$ є проекціями відрізка прямої, що з'єднує точки G і C , на координатні площини системи $oxyz$ (рис. 3.1 і 3.2).

Зі співвідношень (3.2) безпосередньо випливає, що

$$x_C - x_G = (z_C - z_G) \operatorname{tg} \psi; \quad y_C - y_G = (z_C - z_G) \operatorname{tg} \theta.$$

При посадці судна прямо і на рівний киль співвідношення рівноваги (3.3) мають вигляд

$$x_C = x_G; \quad y_C = y_G = 0.$$

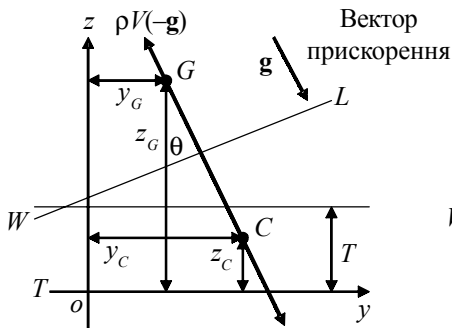


Рис. 3.1. Проекції діючих сил на ДП

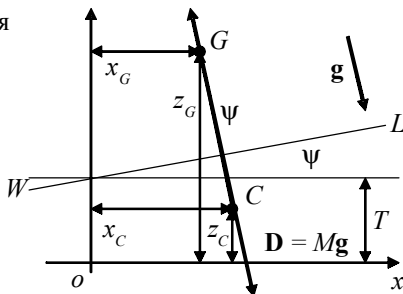


Рис. 3.2. Проекції діючих сил на площу М-ШІ

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

2.1. Установка в цілому (див. розд. 1)

2.2. Вузли, що використовуються при виконанні даної лабораторної роботи: переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики осадки і кутів нахилу моделі; ПК з аналого-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

3. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою та її описом. Вивчити способи визначення характеристик посадки судна. Переміщенням рухомих вантажів на судні одержати "Посадку прямо і на рівний кіль". Обчислити значення параметрів посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Визначити елементи зануреного об'єму корпусу судна (див. ЛР № 2) і зафіксувати їх у протоколі досліджень. З умов рівноваги визначити положення центра ваги судна при посадці прямо і на рівний кіль. Занести ці дані до протоколу досліджень. Оформити звіт про роботу.

Контрольні запитання

1. Які сили діють на судно на тихій воді?
2. Як визначаються моменти цих сил?

3. За якими формулами обчислюються статичні моменти зануреного об'єму корпусу судна?

4. Як визначається маса і координати центра ваги судна?

5. За якими формулами обчислюються статичні моменти маси судна?

6. Як визначається сила плавучості судна і її проекції на осі системи координат, пов'язаної з судном?

7. Як визначаються проекції моменту сили плавучості на осі тієї ж системи координат? Як формулюються умови рівноваги судна?

8. Яке геометричне трактування мають умови рівноваги?

9. Як записуються умови рівноваги судна на тихій воді при посадці прямо і на рівний киль?

Лабораторна робота № 4

ЗМІНА ОСАДКИ І КООРДИНАТ ЦЕНТРА ВЕЛИЧИНИ ПІД ЧАС ПРИЙОМУ (ЗНЯТТЯ) ВАНТАЖУ

Мета роботи – вивчення впливу прийому (зняття) вантажу на зміну осадки судна і координати центра величини.

1. Теоретичні положення

Розглядається рівновага судна на тихій воді в положенні судна прямо і на рівний киль. Умовами рівноваги (див. ЛР № 3) є:

рівність нулю суми всіх діючих сил (у розглянутому випадку рівність сили ваги судна D силі плавучості $\rho g V$: $D = \rho g V$);

рівність нулю суми моментів усіх діючих сил або дія сили ваги D і сили плавучості $\rho g V$ по одній вертикалі, що призводить до наступної рівності координат умовних точок G і C прикладання цих сил у положенні

прямо і на рівний киль: $x_G = x_C$;
 $y_G = y_C = 0$.

Потім здійснюється такий прийом вантажу на судно, при якому не виникає ні крену, ні диференту. Вантаж (рис 4.1) вважається довільним за вагою чи малим, тобто не перевищуючим 10 % водотоннажності судна.

При прийомі на судно ван-

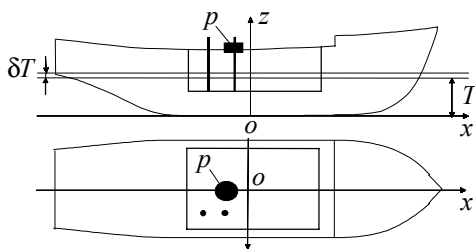


Рис. 4.1. Зміна осадки судна при прийомі вантажу

тажу (див. рис. 4.1), сила ваги якого дорівнює p , вага судна збільшиться і стане $D_1 = D + p$. Оскільки $D_1 = \rho g V_1$ і $D = \rho g V$, то $p = \rho g(V_1 - V) = \rho g \delta V$. Тут δV – збільшення об'ємної водотоннажності, що компенсує прийом вантажу p .

Якщо вантаж вагою p буде знято з судна, то p потрібно взяти зі знаком "мінус". Тоді різниця $(V_1 - V)$ буде теж від'ємною і покаже, наскільки зменшилася об'ємна водотоннажність.

Прийом вантажу вагою p , координатами центра ваги якого є величини x_p, y_p і z_p , призводить до зміни координат центра ваги судна x_G, y_G і z_G . Ці зміни за теоремою моментів записуються в такий спосіб:

$$\delta x_G = \frac{p}{D+p}(x_p - x_G); \quad \delta y_G = \frac{p}{D+p}(y_p - y_G); \quad \delta z_G = \frac{p}{D+p}(z_p - z_G).$$

Таким чином, новими координатами центра ваги судна стануть

$$x_{G1} = x_G + \delta x_G; \quad y_{G1} = y_G + \delta y_G; \quad z_{G1} = z_G + \delta z_G.$$

Наслідком зміни ваги є зміна об'ємної водотоннажності судна, що відбувається шляхом зміни осадки $\delta T_C = T_1 - T$. При цьому зміни координат центра ваги зануреного об'єму визначаються як різниці $\delta x_C = x_{C1} - x_C$; $\delta y_C = y_{C1} - y_C$; $\delta z_C = z_{C1} - z_C$.

Умова рівноваги, яка свідчить про те, що сили діють по одній вертикалі і внаслідок цього судно не має ні крену, ні диференту, виконується і після прийому вантажу, якщо нові умовні координати точок прикладення сили ваги і сили плавучості будуть знаходитися у відношеннях $x_{G1} = x_C$; $y_{G1} = y_C$.

Оскільки до прийому вантажу $x_G = x_C$; $y_G = y_C = 0$, то після прийому стають справедливими залежності $\delta x_G = \delta x_C$; $\delta y_G = \delta y_C$.

Для величин δx_C і δy_C за допомогою теореми моментів маємо

$$\delta x_C = \frac{\delta V}{V + \delta V}(x_v - x_C); \quad \delta y_C = \frac{\delta V}{V + \delta V}(y_v - y_C); \quad \delta z_C = \frac{\delta V}{V + \delta V}(z_v - z_C).$$

Тут через x_v, y_v і z_v позначені координати центра ваги об'єму δV .

Так як $\frac{p}{D+p} = \frac{\delta V}{V + \delta V}$, то, підставивши у співвідношення $\delta x_G = \delta x_C$;

$\delta x_G = \delta x_C$ отримані раніше вирази для збільшень координат точок G і C , одержимо

$$x_p - x_G = x_v - x_C; \quad y_p - y_G = y_v - y_C;$$

Звідси, враховуючи, що $x_G = x_C; y_G = y_C = 0$, маємо

$$x_p = x_v; y_p = y_v = 0. \quad (4.1)$$

Отже, щоб при прийомі чи знятті вантажу судно не одержало ні крену, ні диференту, центр ваги цього вантажу p повинен знаходитися на одній вертикалі з центром об'єму додаткового шару δV .

Якщо вантаж малий, то в межах зміни осадки борта судна можна вважати прямими і додатковий об'єм корпусу, що ввійшов у воду, обчислювати за наближеною формулою $\delta V = S\delta T$, де S – площа вихідної ватерлінії. Тоді рівняння рівноваги прийме вигляд $p = \rho g S \delta T$, що дозволить визначити збільшення осадки судна у такий спосіб:

$$\delta T = \frac{p}{\rho g S}.$$

Оскільки при прямих бортах центр ваги додаткової водотоннажності δV розташовується над центром ваги площі вихідної ватерлінії – в точці F , умови (4.1) набувають вигляду

$$x_p = x_F; y_p = y_F = 0, \quad (4.2)$$

Ці співвідношення обумовлюють наступний висновок: щоб при прийомі чи знятті малого вантажу судно не одержало ні крену, ні диференту, центр ваги цього вантажу повинен знаходитися на одній вертикалі з центром ваги площі вихідної ватерлінії.

2. Склад експериментальної установки для виконання ЛР

2.1. Установка в цілому (див. розд. 1)

2.2. Вузли, що використовуються при виконанні даної лабораторної роботи: переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики осадки і кутів нахилу моделі; ПК з аналого-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

Прийом (зняття) вантажу p масою 5 кг здійснюється на стрижень (вертикаль), що розташовується близько до центра ваги площі вихідної ватерлінії (див. рис. 4.1).

3. Порядок виконання роботи

Вивчити схему прийому (зняття) вантажу на судно, за якою воно не повинно одержати ні крену, ні диференту. Вибрати необхідний вантаж. Зробити прийом (зняття) вантажу. Виконати необхідні виміри параметрів посадки судна і характеристик зануреного об'єму до і після прийому (зняття) вантажу (див. ЛР № 1 і 2). Виконати обчислення осадки після прийому (зняття) вантажу за формулами розділу "Теоретичні положення". Оформити звіт про роботу.

4. Обробка результатів

Визначити осадку моделі за марками осадки чи за допомогою осадкоміра. Визначити за кривими елементів теоретичного креслення чи за допомогою обчислювального комплексу характеристики зануреного об'єму корпусу судна до і після прийому (зняття) вантажу. Обчислити зміну осадки. Зробити порівняння величин, отриманих у досліді та при виконанні розрахунку з визначення збільшення осадки. Сформулювати висновки до лабораторної роботи.

Контрольні запитання

1. Як формуються в загальному випадку умови рівноваги судна на тихій воді?
2. Яке фізичне і геометричне трактування мають умови рівноваги судна на тихій воді?
3. Куди треба прийняти великий вантаж на судно, щоб воно не отримало ні крену, ні диференту?
4. Куди треба прийняти малий вантаж на судно, щоб воно не отримало ні крену, ні диференту?
5. Як теоретично і практично визначити зміну осадки судна при прийомі (знятті) малого і великого вантажу?

Лабораторна робота № 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПОЧАТКОВОЇ ОСТІЙНОСТІ СУДНА

Метою роботи є поглиблене вивчення розділу "Початкова остійність судна", оволодіння практичними навичками у роботі з вимірю-

вальною апаратурою і приладами, знайомство з методами обробки результатів дослідів та їх інженерної оцінки.

1. Загальні відомості

1.1. Рівновага судна під дією кренувального моменту

Розглянемо судно, що знаходиться в рівновазі на тихій воді при посадці прямо і на рівний кіль. У цьому положенні на нього діє сила ваги судна $\mathbf{D}$, модуль якої визначається формулою $D = Mg$, де M – маса судна, і сила плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$, де V – об'єм зануреної частини корпусу судна.

Умовами рівноваги судна є рівність нулю суми всіх діючих сил і рівність нулю суми моментів цих сил, обчислених відносно початку координат – точки O системи координат $Oxyz$, пов'язаної з судном:

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{P}_k \equiv \mathbf{D} + \rho V(-\mathbf{g}) = 0; \quad \sum_{k=1}^K \mathbf{M}_k \equiv \mathbf{M}_D + \mathbf{M}_V = 0.$$

При нахилах судна у поперечній площині кренувальним моментом $\mathbf{M}_p$ пара сил – сили ваги судна $\mathbf{D} = Mg$ і сили плавучості $\rho V(-\mathbf{g})$ – починає утворювати відновлювальний момент $\mathbf{M}_B = \mathbf{M}_D + \mathbf{M}_V$ (рис. 5.1), що компенсує дію кренувального моменту $\mathbf{M}_p$.

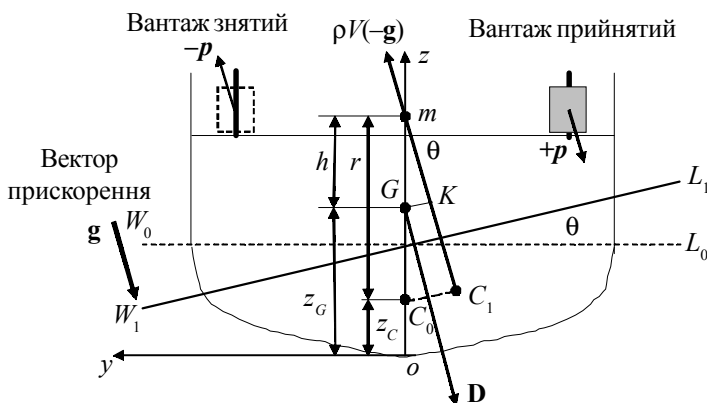


Рис. 5.1. Кренувальний і відновлювальний моменти

Умови рівноваги судна при дії кренувального моменту $\mathbf{M}_p$ записуються у вигляді

$$\mathbf{D} + \rho V(-\mathbf{g}) = 0; \mathbf{M}_p + \mathbf{M}_B = 0.$$

Момент кренувального $\mathbf{M}_p$ створюється шляхом горизонтального переносу в поперечній площині на відстань l_y вантажу, сила ваги якого визначається за формулою $\mathbf{p} = m\mathbf{g}$, де m – маса вантажу (рис. 5.2).

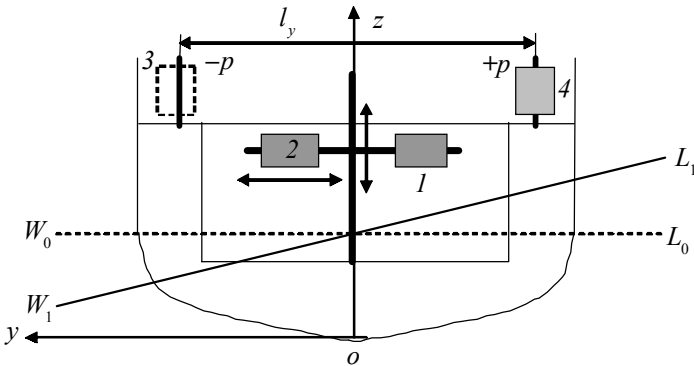


Рис. 5.2. Схема регулювання положення центра ваги моделі судна і створення кренувального моменту:

1 – трюм; 2 – стійка з вантажами; 3 – шпильки; 4 – вантажі кренбаласту

Величина цього моменту

$$Mp = mgl_y. \quad (5.1)$$

Значення відновлювального моменту, що компенсує кренувальний момент, при малих кутах крену визначається виразом

$$M_B = -Dh\theta, \quad (5.2)$$

де h – початкова поперечна метацентрична висота.

З урахуванням рівностей (5.1) і (5.2) умови рівноваги судна при дії кренувального моменту записуються у вигляді

$$M = \rho V; \quad ml_y = Mh\theta. \quad (5.3)$$

1.2. Визначення h та z_G

З рівнянь рівноваги (5.3) безпосередньо випливає

$$h = \frac{ml_y}{M\theta}, \quad (5.4)$$

де кут крену θ (у радіанах) визначається за показниками приладів чи обчислюється за допомогою марок заглиблення (див. ЛР № 1).

Значення початкової метацентричної висоти h також визначається виразом (див. рис. 5.1)

$$h = z_C + r - z_G, \quad (5.5)$$

де r – поперечний метацентричний радіус; z_C – апліката центра ваги зануреного об'єму корпусу судна; z_G – апліката центра ваги судна.

Визначивши кут крену судна θ і підставивши отримане за формулою (5.4) значення початкової поперечної метацентричної висоти h у вираз (5.5), отримаємо наступний вираз для аплікати центра ваги судна:

$$z_G = z_C + r - h, \quad (5.6)$$

де z_G і r для вихідного положення судна – посадки по ватерлінії W_0L_0 – можуть бути визначені за допомогою "Кривих елементів ТК".

1.3. Дослід кренування

Мірою поперечної початкової остійності судна, тобто мірою його здатності протистояти дії кренувальних моментів, є коефіцієнт остійності Dh і метацентрична висота h . З погляду на безпеку плавання судна ці величини становлять найбільший інтерес, тому що серед безлічі коефіцієнтів остійності й метацентричних висот, утворених нахилами судна в по-різному орієнтованих вертикальних площинах, ці величини мають мінімальні значення. Перекинути судно легше за все при нахилах у поперечній площині.

Поперечна метацентрична висота h визначається за формулою (5.5). Величини r і z_C , що входять в цю формулу, можуть бути, у свою чергу, визначені за допомогою "Кривих елементів ТК", а величина z_G – за допомогою журналу вагового навантаження. Однак на практиці (до моменту спуску судна на воду чи після його істотної модернізації або тривалої експлуатації) фактичний стан навантаження судна, як правило, помітно відрізняється від розрахункового, отриманого за допомогою проектних даних і записів у журналі навантаження. Тому досить точно визначити стан вагового навантаження судна можна тільки в результаті спеціально поставленого досліді, названого дослідом кренування.

Разом з тим специфічність даних про стан навантаження судна, одержаних в результаті дослідження, полягає в тому, що одержані при нахилах судна значення початкової метацентричної висоти h містять у собі помилки, природа яких пов'язана з похибкою визначення маси переносних вантажів і відстаней, на які вони переносяться, похибкою виміру кутів крену, визначення водотоннажності судна за замірами осадки і т. п.

Сумарний вплив факторів такого роду визначає випадковий характер результату дослідження. Отже, оцінку дійсного значення розглянутої величини h потрібно робити за допомогою методів теорії ймовірностей, враховуючи, що сам процес вимірів в умовах дослідження кренування генерує появу значень випадкової величини h' , пов'язаної з не випадковою величиною h співвідношенням

$$h' = h + \epsilon',$$

де ϵ' – випадкова помилка, породжувана вимірами.

При обробці результатів дослідження, тобто при визначенні характеристик випадкової величини h' , необхідно враховувати дві обставини:

в оцінці дійсного значення метацентричної висоти h бере участь не нескінченне число значень випадкової величини h' , а набір її дискретних значень h'_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, який називають вибіркою;

об'єм вибірки – число n , як правило, буває дуже обмеженим.

Ці обставини обумовлюють виникнення питання про показність вибірки (кількості необхідних вимірів), а також про те, яка точність і надійність оцінки дійсного значення розглянутої величини може бути досягнута за допомогою набору отриманих вибірових значень.

Відповіді на ці питання дають можливість застосування методу довірчих інтервалів, за яким дійсне значення h розглянутої величини оцінюється за допомогою середнього арифметичного $\bar{h}$ всіх її обмірюваних значень, отриманих на основі дослідних даних, величини помилки ϵ , що виникає при заміні h на $\bar{h}$, і величини інтервалу $(-\epsilon, +\epsilon)$, що покриває середнє значення $\bar{h}$ із заданою надійністю.

Надійністю оцінки величини h називається імовірність події, яка полягає в тому що інтервал $(-\epsilon, +\epsilon)$ з центром у точці $\bar{h}$ накріє точку h . У залежності від рівня відповідальності визначення вимірюваної величини надійність її оцінки приймається рівною 0,95; 0,99 чи 0,999.

Такий спосіб оцінювання дійсного значення h розглянутої величини називається *інтервальною оцінкою*. Більш простий спосіб оцінювання,

в якому невідома величина h визначається одним числом, наприклад середнім значенням $\bar{h}'$, називається *точковою оцінкою*. Точковою оцінкою може бути і результат одиничного виміру.

В лабораторних умовах при ознайомленні з характеристиками морехідних якостей судна і зі способами їх визначення зазвичай одержують і користуються точковими оцінками (результатами одиничних вимірів). Вимога збільшення рівня відповідальності при виконанні вимірів неминуче спричиняє використання способу інтервальної оцінки. Така вимога звичайно висувається класифікаційними товариствами при обчисленні значень характеристик морехідних якостей натурного судна. Тому в натурних умовах вимір значень однієї й тієї ж величини багаторазово повторюється й обчислювальні процедури на безлічі отриманих вимірів доводяться до інтервальної оцінки розглянутих характеристик.

У даній лабораторній роботі можливість багаторазового повторення вимірів, пов'язаних із визначенням метацентричної висоти й аплікати центра ваги судна, реалізується за допомогою безлічі вантажів, розміщених на палубі уздовж бортів моделі. При виконанні дослідів кренування ці вантажі по черзі переносяться з борту на борт.

При цьому також по черзі проводяться виміри експериментальних значень кутів крену θ_i , $i = 1, 2, 3 \dots$ і обчислення експериментальних значень метацентричної висоти h'_i , $i = 1, 2, 3, \dots$. Якщо при цьому виконується n незалежних дослідів, то питання про те, до яких помилок може призвести заміна величини h її точковою оцінкою h'_i , розв'язується за допомогою наступного довірчого інтервалу:

$$\bar{h}' - \varepsilon < h < \bar{h}' + \varepsilon$$

де діапазон ε можливих значень помилки виміру обчислюється за формулою

$$\varepsilon = t_q \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

і величина $\bar{h}'$, як середнє значення (незміщена оцінка математичного сподівання) випадкової величини h' визначається у такий спосіб:

$$\bar{h}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h'_i.$$

У цих формулах t_q – параметр, що залежить від об'єму вибірки n і рівня надійності β виробленої оцінки; σ – незміщена оцінка середнього квадратичного відхилення випадкової величини h' ,

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \left[\sum_{i=1}^n (h'_i - \bar{h}')^2 \right]^{1/2}.$$

Для рівня надійності (довірчої ймовірності), рівного 0,999 (при $\beta = 0,999$) у табл. 5.1 наведені значення параметра t_q в залежності від числа n зроблених вимірів.

Таблиця 5.1. Залежність параметра t_q від об'єму вибірки

Число дослідів	n	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Параметр розподілу Стьюдента	t_q	5,4	5,0	4,8	4,6	4,5	4,3	4,2	4,1	4,0

У залежності від числа дослідів n імовірна відносна похибка визначення метацентричної висоти обчислюється за формулою

$$d_h = \frac{t_q \sigma}{\bar{h}' \sqrt{n}}.$$

Ця похибка враховує випадкові помилки визначення складових кренувального моменту (маси переносного вантажу і плеча переносу), кута крену і т. п.

Абсолютна похибка визначається виразом

$$\Delta_h = \pm d_h \bar{h}'.$$

Визначення величини h вважається якісним, якщо виконується умова $(h'_i - \bar{h}') < 2\sigma$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Виміри, що не задовольняють цій умові, виключаються з обробки. При цьому їх загальне число n зменшується й обчислення оцінки метацентричної висоти повторюється.

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Повний склад установки наведено у розд. 1. При виконанні даної ЛР використовуються переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики осадки і кутів нахилу моделі; ПК із аналого-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер. Для виконання даної ЛР модель судна (див. рис. 5.2) має трюм 1, обладнаний стійкою з вантажами 2. Вантажі на стійці можуть переміщатися по вертикалі та по горизонталі для зміни положення центра ваги моделі й усунення її початкового крену. На палубі розташовані шпильки 3, на які надіваються вантажі кренбаласту 4. Кути крену реєструються гіроскопічним інклінометром, маятниковим кутоміром і, крім того, можуть бути визначені за допомогою марок осадки.

3. Порядок виконання роботи

Установити задане положення рухомих вантажів 2 по висоті симетрично до діаметральної площини моделі (див. рис. 5.2), забезпечивши тим самим посадку моделі прямо і на рівний кіль. Увімкнути вимірювальну апаратуру. Визначити осадку моделі в умовах досліду. Зафіксувати показання вимірювальних приладів. Приступити до виконання досліду кренування. Для виконання точкової оцінки метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі один із вантажів кренбаласту обережно знімається зі шпильки і переноситься на протилежний борт. Стале значення кута крену моделі фіксується. Для виконання інтервальної оцінки цих же величин (метацентричної висоти й аплікати центра ваги) вантажі переносяться по черзі. При кожнім переносі фіксується стале значення кута крену моделі. Число вимірів кутів крену, не рівних нулю, має бути не менш 10. Виключити апаратуру й обробити результати експерименту. Оформити звіт про роботу.

4. Обробка результатів досліду кренування (приклад)

Вихідні дані досліду кренування для точкової та інтервальної оцінок метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі заносяться у відповідні клітинки табл. 5.2. При цьому інформація про параметри

зануреного об'єму (D, S, r, z_C) знімається з гідростатичних кривих для встановленої осадки T .

Таблиця 5.2. Вихідні дані для дослідів кренування

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Осадка	T	м	0,19
2	Водотоннажність	D	Н	821,29
3	Площа ватерлінії	S	м ²	0,75
4	Поперечний метацентричний радіус	r	м	0,18
5	Апліката центра величини	z_C	м	0,1
6	Вага кренбаласту	p	Н	1,472
7	Плече переносу кренбаласту	l_y	м	0,437
8	Щільність води в умовах дослідів	ρ	кг/м ³	1000
9	Число вимірів при інтервальній оцінці характеристик остійності	n		10
10	Параметр розподілу Стюдента	t_q		4,8

Розрахункове значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги визначаються за наведеними вище формулами в табличній формі. Для точкової оцінки використовується табл. 5.3, для інтервальної – табл. 5.4 і 5.5. У процесі одержання інтервальної оцінки заміряні значення кутів крену θ (у радіанах) заносяться в комірки табл. 5.4. Подальші обчислення виконуються в табл. 5.5.

Таблиця 5.3. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги судна (точкова оцінка)

№ п/п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Чисельні значення
1	Маса моделі	кг	$M = D / g$	83,72
2	Маса кренбаласту	кг	$m = p / g$	0,15
3	Кренувальний момент	Н·см	$M_p = + p l_y$	64,30
4	Кут крену	рад	θ	0,021
5	Розрахункове значення метацентричної висоти	см	$h = m l_y / M \theta$	3,73
6	Розрахункове значення аплікати центра ваги	см	$z_G = z_C + r - h$	24,27

Таблиця 5.4. Значення кренувального моменту, кута крену і метацентричної висоти (інтервальна оцінка)

Номер досліджу	Кренувальний момент M'_{pi} , Н·см	Кут крену θ_i , рад	Метацентрична висота h'_i , см	Відхилення $\epsilon'_i = h'_i - \bar{h}'$, см	Квадрат відхилення $(\epsilon'_i)^2$, см ²
1	2	3	4	5	6
1	64,30	0,021	3,73	0,10	0,0100
2	128,61	0,043	3,68	0,06	0,0032
3	192,91	0,066	3,57	-0,06	0,0034
4	128,61	0,042	3,73	0,10	0,0100
5	64,30	0,021	3,82	0,19	0,0100
6	64,30	0,022	3,64	0,01	0,0002
7	128,61	0,043	3,64	0,01	0,0002
8	192,91	0,067	3,51	-0,12	0,0150
9	128,61	0,044	3,56	-0,07	0,0048
10	64,30	0,023	3,40	-0,22	0,0502
Σ			$\Sigma_1 = 36,28$		$\Sigma_2 = 0,1335$

Таблиця. 5.5. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги (інтервальна оцінка)

№ п/п	Найменування величини	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Значення
1	Середнє значення метацентричної висоти	см	$\bar{h}' = \Sigma_1 / n$	3,63
2	Відносна ймовірна похибка обчислення метацентричної висоти		$d_h = t_q \sigma / (\bar{h}' \sqrt{n})$	0,0510
5	Абсолютна ймовірна похибка дослідження кренування	см	$\Delta_h = \pm d_h \bar{h}'$	$\pm 0,185$
6	Розрахункове значення метацентричної висоти	см	$h' = \bar{h}' - \Delta_h $	3,44
7	Розрахункове значення аплікати центра ваги моделі	см	$z'_G = z_C + r - h'$	24,56

Середнє значення метацентричної висоти (незміщена оцінка математичного сподівання метацентричної висоти) визначається формулою $\bar{h}' = \Sigma_1 / n = 3,63$. Незміщена оцінка середнього квадратичного відхилення метацентричної висоти обчислюється за допомогою виразу $\sigma = \sqrt{\Sigma_2 / (n - 1)} = 0,1218$.

1. Що є мірою початкової остійності судна?
2. Які основні допущення теорії початкової остійності?
3. Яка мета досліджу кренування?
4. Як проводиться кренування на реальному судні?
5. Які поняття теорії ймовірностей використовуються при обробці результатів експерименту?

Лабораторна робота № 6

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДВІШЕНИХ ВАНТАЖІВ
НА ПОЧАТКОВУ ОСТІЙНІСТЬ СУДНА**

Метою роботи є вивчення впливу підвішених вантажів на початкову остійність судна, кількісна оцінка такого впливу, порівняння теоретичного й експериментального значень поправки до метацентричної висоти на вплив зміщення вантажу.

1. Теоретичні відомості

Під час експлуатації морських транспортних суден, плавкранів, бурових та інших суден доводиться враховувати зміну остійності, викликану наявністю підвішених вантажів. Цей облік виконується в припущенні про статичний характер нахилу судна.

Допустимо, що на судні знаходиться одиничний вантаж вагою p_1 , підвішений на нитці довжиною l_{p1} , у точці A (рис. 6.1). Центр ваги вантажу розташований у точці B_0 .

Якщо вантаж закріплений у точці B_0 , то при нахилі судна він залишиться в цьому положенні. При знятті закріплення центр його ваги переміститься в бік нахилу по дузі кола $B_0 B_1$ радіусом l_{p1} .

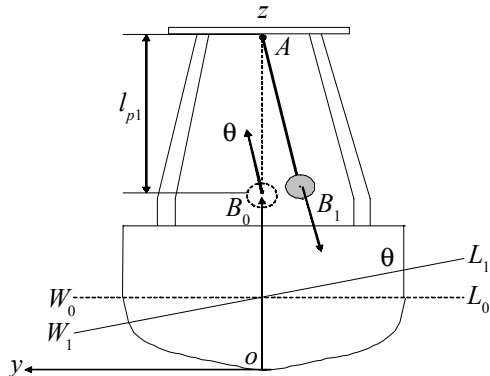


Рис. 6.1. Зміщення підвішеного вантажу при нахилі судна

Припустимо, що відновлювальний момент судна із закріпленим вантажем $\mathbf{M}_B^0$ визначається метацентричною формулою

$$\mathbf{M}_B^0 = - Dh_0 \theta.$$

Після розкріплення вантажу момент $\mathbf{M}_B^0$ зменшиться на величину створюваного вантажем кренувального моменту

$$M_p = + p_1 l_{p1} \theta.$$

Таким чином,

$$M_B^1 = M_B^0 + M = - Dh_0 \theta + p_1 l_{p1} \theta = -D(h_0 - p_1 l_{p1}/D) \theta = -Dh_1 \theta,$$

де $h_1 = h_0 - p_1 l_{p1}/D$.

В останній формулі величина $-p_1 l_{p1}/D$ називається поправкою до метацентричної висоти на вплив підвішеного вантажу δh :

$$\delta h = - p_1 l_{p1}/D.$$

З отриманого виразу випливає, що наявність підвішеного вантажу завжди зменшує метацентричну висоту, а величина поправки аналогічна випадку вертикального переносу вантажу на відстань l_p – у точку його підвісу. Таким чином, одержуємо вираз для виправленої метацентричної висоти

$$h_1 = h_0 + \delta h,$$

що визначає фактичну остійність судна з підвішеним вантажем.

Якщо на судні декілька підвішених вантажів, необхідно просумувати поправки до кожного з них чи при обчисленні координат центра ваги корабля вважати центри ваги таких вантажів розташованими в точках їх підвісу.

Для експериментального знаходження поправки $\delta h = \delta h'$ достатньо порівняти значення метацентричних висот: отриманої в досліді кренування (h'_0), коли вантаж закріплений, і знайденої за результатами лабораторної роботи, де вантаж підвішений (h'_1): $\delta h' = h'_1 - h'_0$. Відносна величина відхилення експериментального значення від теоретичного (у відсотках) визначиться виразом: $\epsilon_{\delta h} = 100(\delta h' - \delta h)/\delta h$.

Аналогічним способом можна оцінити вплив підвішеного вантажу на поздовжню остійність судна. При малому куті поздовжнього нахилу ψ результуючий момент $\mathbf{M}_B^1$, що спрямляє судно,

$$M_B^1 = M_B^0 + M_p = -DH_0 \psi + p_1 l_{p1} \psi = -D(H_0 - p_1 l_{p1}/D) \psi = -DH_1 \psi.$$

Таким чином, поправка до поздовжньої метацентричної висоти на вплив підвішеного вантажу визначиться виразом

$$\delta H = -p_1 l_{p1} / D.$$

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Той самий, що і в ЛР № 5. Для виконання даної ЛР модель судна обладнана щоглою, на якій підвішений вантаж вагою p_1 (див. рис. 6.1). Модель судна (див. рис. 5.2) також має трюм I , обладнаний стійкою з вантажами 2. Вантажі на стійці можуть переміщатися для зміни положення центра ваги моделі й усунення її початкового крену. На палубі розташовані шпильки 3, на які надіваються вантажі кренбаласта 4 і за допомогою яких здійснюється дослід кренування. Кути крену моделі, що виникають при цьому, реєструються гіроскопічним інклінометром, маятниковим кутоміром і, крім того, можуть бути визначені за допомогою марок осадки.

3. Порядок виконання роботи

Переконалися в тому, що положення вантажів 2 по висоті відповідає прийнятому в ЛР № 5 (дослід кренування) і симетричне щодо діаметральної площини моделі, на якій в потрібному місці знаходиться закріплений вантаж, який потім буде використовуватися як підвішений. Увімкнути вимірювальну апаратуру. Визначити осадку моделі в умовах досліді. Зафіксувати початкові показання вимірювальних приладів. Зробити точкову оцінку значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з закріпленим вантажем (див. ЛР № 5). Замірити довжину нитки l_{p1} від точки підвісу до центра ваги вантажу, впевнитися у тому, що вона дорівнює розрахунковій. Звільнити підвішений вантаж від фіксаторів. Зробити точкову оцінку значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з підвішеним вантажем (див. ЛР № 5). Виключити апаратуру й обробити результати експерименту. Оформити звіт.

4. Обробка результатів досліді (приклад)

Розрахункові значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі визначаються в тому ж порядку, як і в досліді кренування, неза-

лежно від того, що знаходиться на моделі – закріплений чи вільно висячий вантаж. Для скорочення часу досліджень виконується тільки точкова оцінка значень цих величин. Додатково робиться порівняння експериментального і теоретичного значень поправки до метацентричної висоти на вплив підвішеного вантажу. Необхідні вихідні дані заносяться у відповідні клітинки табл. 6.1. При цьому інформація про параметри зануреного об'єму (D, S, r, z_C) знімається з гідростатичних кривих для даної величини осадки T . Точкова оцінка значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з закріпленим вантажем виконується в табл. 6.2, а з підвішеним вантажем – у табл. 6.3.

Таблиця 6.1. Вихідні дані для дослідів кренування

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Довжина моделі	L	м	1,66
2	Ширина по ватерлінії	B	м	0,54
3	Осадка	T	м	0,19
4	Водотоннажність	D	Н	821,29
5	Площа ватерлінії	S	м ²	0,75
6	Поперечний метацентричний радіус	r	м	0,18
7	Апліката центра величини	z_C	м	0,1
8	Вага кренбаласту	p	Н	1,472
9	Плече переносу кренбаласту	l_v	м	0,437
10	Щільність води в умовах дослідів	ρ	кг/м ³	1000
11	Вага підвішеного вантажу	p_1	Н	9,81
12	Довжина нитки підвісу	l_{p1}	м	0,5
13	Теоретична поправка до метацентричної висоти на вплив підвішеного вантажу	$\delta h = -p_1 l_{p1} / D$	м	-0,0060

Таблиця 6.2. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі (підвішений вантаж закріплений)

№ п/п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Чисельні значення
1	Маса моделі	кг	$M = D / g$	83,72
2	Маса кренбаласту	кг	$m = p / g$	0,15
3	Момент, що кренить	Н·м	$M_p = + p l_v$	64,30
4	Кут крену	рад	θ'_0	0,021

Продовж. табл. 6.2

№ п\п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Чисельні значення
5	Розрахункове значення мета- центричної висоти	см	$h'_0 = ml_y / M\theta'_0$	3,73
6	Розрахункове значення аплі- кати центра ваги моделі	см	$z'_G = z_C + r - h'_0$	24,27

Таблиця 6.3. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі (вантаж підвішений)

№ п\п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункова формула	Чисельні значення
1	Маса моделі	кг	$M = D / g$	83,72
2	Маса кренбаласту	кг	$m = p / g$	0,15
3	Момент, що кренить	Н·м	$M_p = + pl_y$	64,30
4	Кут крену	рад	θ'_1	0,026
5	Розрахункове значення мета- центричної висоти	см	$h'_1 = ml_y / M\theta'_1$	3,01
6	Розрахункове значення апліка- ти центра ваги моделі	см	$z''_G = z_C + r - h'_1$	24,99

Експериментальна поправка $\delta h' = h'_1 - h'_0 = -0,72$. Відносне відхилення поправки від теоретичної $\varepsilon_{\delta h} = 100(\delta h' - \delta h) / \delta h = 20,0 \%$.

Контрольні питання

1. Що є мірою початкової остійності судна?
2. Яким чином розрахувати поправку на вплив підвішеного вантажу?
3. Як експериментально визначити таку поправку?
4. Як враховуються підвішені вантажі у складі вагового навантаження судна?

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІДКИХ ВАНТАЖІВ НА ОСТІЙНІСТЬ СУДНА

Метою роботи є вивчення впливу рідких вантажів на початкову остійність судна, кількісна оцінка такого впливу, порівняння теоретичного й експериментального значень поправки до метацентричної висоти на вплив переливання рідкого вантажу.

1. Теоретичні положення

У процесі експлуатації судна часто зустрічаються ситуації, коли суднові ємності заповнені рідиною частково. Вільні поверхні утворюються при баластуванні судна рідким вантажем, витраті запасів води, палива, мастил з танків і цистерн різних суднових систем, в результаті ушкодження корпусу.

При нахиленні судна рідина переливається у бік нахилу, що призводить до зміщення центра ваги судна і до зміни його остійності.

Нехай на судні є одинична цистерна, частково заповнена рідиною (рис. 7.1). Первісне положення вільної поверхні рідкого вантажу визначається прямою $w_0 l_0$, центр ваги вантажу розташовується в точці c_0 . При крені судна на кут θ вільна поверхня прийме положення $w_1 l_1$, а центр ваги переміститься в точку c_1 . При малих нахилах криву $c_0 c_1$ можна вважати дугою кола з центром у точці m і радіусом r_p . Внаслідок перели-

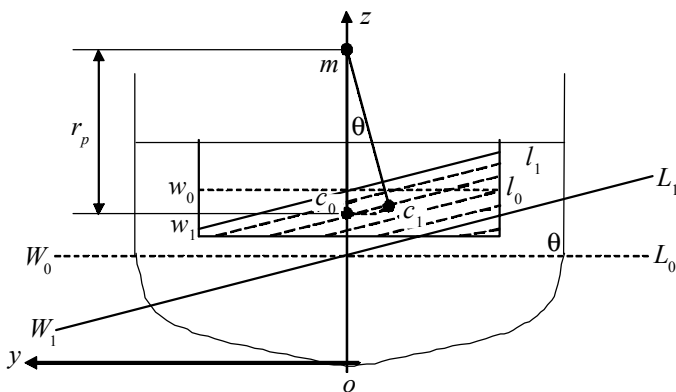


Рис. 7.1. Зміщення рідкого вантажу при нахиленні судна

вання рідини в цистерні виникне кренувальний момент M_p , що визначається за формулою

$$M_p = +p_2 r_p \theta, \quad (7.1)$$

де p_2 – вага вантажу,

$$p_2 = \rho_2 g v. \quad (7.2)$$

Тут ρ_2 – щільність вантажу; v – його об'єм.

Значення радіуса кривизни кривої $c_0 c_1$ за аналогією з радіусом кривизни кривої $C_0 C_1$ можна знайти за формулою $r_p = i_x / v$, якщо відомо центральний момент інерції площі вільної поверхні рідини i_x , обчислений відносно поздовжньої осі, рівнобіжної осі ox . Для прямокутної цистерни довжиною l і шириною b $i_x = lb^3 / 12$.

Підставивши (7.2) у (7.1), одержимо

$$M_p = \rho_2 g i_x \theta.$$

Остання формула показує, що кренувальний момент від зсуву вантажу не залежить від його кількості, а обчислюється значеннями щільності рідини і момента інерції площі її вільної поверхні.

Віднімаючи M_p з відновлювального моменту $M_B^0 = -D h_0 \theta$, визначеного в припущенні, що вантаж p_2 позбавлений можливості переливатися, одержимо фактичний відновлювальний момент M_B^1 , який враховує зсув рідкого вантажу при нахилах судна:

$$M_B^1 = M_B^0 + M_p = -D h_0 \theta + \rho_2 g i_x \theta = -D [h_0 - \rho_2 i_x / (\rho V)] \theta = -D h_1 \theta,$$

де ρ – щільність заборотної води; V – об'ємна водотоннажність судна.

Вираз

$$\delta h = -\rho_2 i_x / (\rho V)$$

є теоретична поправка до метацентричної висоти на вплив рідкого вантажу. Виправлена метацентрична висота визначається за формулою

$$h_1 = h_0 + \delta h.$$

Для експериментального визначення поправки $\delta h = \delta h'$ достатньо порівняти значення метацентричної висоти, отриманої в досліді кренування (h_0'), якщо вантаж закріплений (замінений на твердий такої ж маси),

зі значенням цієї ж величини, знайденої за результатами ЛР, коли в цистерні знаходиться рідкий вантаж (h'_1): $\delta h' = h'_1 - h'_0$. Відносна величина відхилення експериментального значення від теоретичного (у відсотках) визначиться виразом $\epsilon_{\delta h} = 100(\delta h' - \delta h)/\delta h$.

Якщо на судні є m не сполучених між собою відсіків чи цистерн із вільними поверхнями, то кожна з них створює додатковий кренувальний момент і сумарна поправка до метацентричної висоти визначиться виразом

$$\delta h = -\{1/(\rho V)\} \sum_{n=1}^m \rho_n i_{xn}.$$

Аналогічні формули мають місце при розгляді впливу зсуву рідкого вантажу на поздовжню остійність судна.

Якщо відсіки сполучаються між собою, то вільну поверхню в них варто розглядати як єдине ціле з загальною віссю нахилу, відносно якої й обчислюються центральні моменти інерції площі вільної поверхні рідини.

Ефективним засобом зменшення впливу рідких вантажів на остійність є установка розділових перегородок. Можна показати, що за наявності у відсіку q перегородок величина поправки до метацентричної висоти δh зменшується в $(q + 1)^2$ разів.

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Він такий самий, що і в ЛР № 5. Для виконання даної ЛР модель судна обладнана відкритою цистерною, в якій може знаходитися рідкий вантаж вагою p_2 (див. рис. 7.1). Перед заповненням водою цистерни з неї виймається твердий вантаж, що має однакові вагу і координати центра ваги із рідким вантажем. Модель судна (див. рис. 5.2) також має трюм 1, обладнаний стійкою з вантажами 2, що можуть переміщатися для зміни положення центра ваги моделі й усунення її початкового крену. На палубі розташовані шпильки 3, на які надіваються вантажі кренбаласту 4, що допомагають здійснити дослід кренування. Кути крену моделі, що при цьому виникають, реєструються гіроскопічним інклінометром, маятниковим кутоміром і, крім цього, можуть бути визначені за допомогою марок осадки.

3. Порядок виконання роботи

Переконатися в тому, що положення вантажів 2 по висоті відповідає прийнятому в ЛР № 5 (дослід кренування) і симетричне відносно діаметральної площини моделі, а також що в цистерні знаходиться твердий вантаж, рівний за масою рідкому вантажу, який потім його замінить. Увімкнути вимірювальну апаратуру. Визначити осадку моделі в умовах досліді. Зафіксувати початкові показання вимірювальних приладів. Зробити точкову оцінку значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з "затверділим рідким вантажем" (див. ЛР № 5). Видалити з цистерни твердий вантаж і замінити його такою ж кількістю рідини за допомогою мірної судини. Замірити довжину l і ширину b цистерни. Зробити точкову оцінку значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з рідким вантажем (див. ЛР № 5). Виключити вимірювальну апаратуру й обробити результати експеримента. Скласти звіт про роботу.

4. Обробка результатів досліді (приклад)

Розрахункові значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі визначаються в тому ж порядку, що й при досліді кренування, незалежно від того, що знаходиться в цистерні – твердий чи рідкий вантаж. Для скорочення часу досліджень виконується тільки точкова оцінка значень цих величин. Додатково здійснюється порівняння експериментального і теоретичного значень поправки до метацентричної висоти на вплив рідкого вантажу.

Необхідні вихідні дані заносяться у відповідні клітинки табл. 7.1. При цьому інформація про параметри зануреного об'єму (D, S, r, z_C) знімається з гідростатичних кривих для даної величини осадки T .

Таблиця 7.1. Вихідні дані для досліді кренування

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	Осадка	T	м	0,19
2	Водотоннажність	D	Н	821,29
3	Площа ватерлінії	S	м ²	0,75
4	Поперечний метацентричний радіус	r	м	0,18
5	Апліката центра величини	z_C	м	0,1
6	Вага кренбаласта	p	Н	1,472
7	Плече переносу кренбаласта	l_y	м	0,437

Продовж. табл. 7.1

№ п/п	Найменування характеристики	Позначення	Одиниця виміру	Значення
8	Щільність забортної води	ρ	кг/м ³	1000
9	Щільність води в цистерні	ρ^2	кг/м ³	1000
10	Вага рідкого вантажу	p_2	Н	9,81
11	Довжина цистерни	l	м	0,20
12	Ширина цистерни	b	м	0,36
13	Момент інерції площі вільної поверхні рідини в цистерні	$i_x = lb^3/12$	м ⁴	0,00078
14	Теоретична поправка до метацентричної висоти на вплив рідкого вантажу	$\delta h = -\rho_2 i_x / (\rho V)$	м	-0,00936

Точкова оцінка значень метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі з "затверділим рідким вантажем" виконується в табл. 7.2, а з рідким вантажем – у табл.7.3.

Таблиця 7.2. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги моделі (рідкий вантаж замінений твердим такої ж маси)

№ п/п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункові формули	Чисельні значення
1	Маса моделі	кг	$M = D / g$	83,72
2	Маса кренбаласту	кг	$m = p / g$	0,15
3	Кренуавльний момент	Н·см	$M_p = + p l_y$	64,30
4	Кут крена	рад	θ'_0	0,021
5	Розрахункове значення метацентричної висоти	см	$h'_0 = m l_y / M \theta'_0$	3,73
6	Розрахункове значення аплікати центра ваги моделі	см	$z'_G = zC + r - h'_0$	24,27

Таблиця 7.3. Розрахунок дослідного значення метацентричної висоти й аплікати центра ваги (цистерна з рідким вантажем)

№ п/п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункові формули	Чисельні значення
1	Маса моделі	кг	$M = D / g$	83,72
2	Маса кренбаласту	кг	$m = p / g$	0,15

Продовж. табл. 7.3

№ п\п	Найменування величин	Одиниця виміру	Розрахункові формули	Чисельні значення
3	Кренувальний момент	Н·см	$M_p = + p l_y$	64,30
4	Кут крена	рад	θ'_1	0,030
5	Розрахункове значення метацентричної висоти	см	$h'_1 = m l_y / M \theta'_1$	2,61
6	Розрахункове значення аплікати центра ваги моделі	см	$z''_G = z_C + r - h'_1$	25,39

Чисельне значення експериментальної поправки до метацентричної висоти

$$\delta h' = h'_1 - h'_0 = -1,12.$$

Відносне відхилення експериментальної поправки від теоретичної

$$\varepsilon_{\delta h} = 100(\delta h' - \delta h) / \delta h = 19,1 \, \%.$$

Контрольні питання

1. Що є мірою початкової остійності судна?
2. Які основні припущення теорії початкової остійності?
3. Яка мета досліда кренування?
4. Яким чином розрахувати поправку δh на вплив рідкого вантажу?
5. Як експериментально визначити дану поправку?
6. Яким чином зменшити вплив рідких вантажів на остійність судна?

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕНОСУ ВАНТАЖУ НА ПОСАДКУ І ПОЧАТКОВУ ОСТІЙНІСТЬ СУДНА

Мета роботи – вивчення впливу вертикального і горизонтального переносу вантажу на характеристики посадки й остійності судна.

1. Теоретичні положення

1.1. Розбивка процесу переносу вантажу на етапи

Допустимо, що судно знаходиться в положенні рівноваги на тихій воді і не має ні крену, ні диференту. Його сила ваги $\mathbf{D} = Mg$. Сила $\mathbf{D}$ включає в себе силу ваги розташованого на судні вантажу: $\mathbf{p} = m \mathbf{g}$; M і m – маса судна і маса вантажу відповідно.

Спочатку вантаж знаходиться в положенні, що визначається координатами x_{p0}, y_{p0}, z_{p0} його центра ваги в системі координат $oxyz$, зв'язаний з судном. Потім вантаж переноситься. Нове положення його центра ваги визначається координатами x_{p1}, y_{p1}, z_{p1} . Плічми переносу вантажу, заміряними в напрямках, рівнобіжних координатним осям системи координат $oxyz$, зв'язаної з судном, є наступні величини:

$l_{px} = x_{p1} - x_{p0}$, (поздовжній перенос вантажу в горизонтальній площині);

$l_{py} = y_{p1} - y_{p0}$ (поперечний перенос вантажу в горизонтальній площині);

$l_{pz} = z_{p1} - z_{p0}$ (вертикальний перенос вантажу).

Це дозволяє розділити перенос на два етапи: перенос вантажу у вертикальному і горизонтальному напрямках, і досліджувати на кожному етапі особливості впливу різних напрямків переносу вантажу на характеристики посадки судна і його остійності.

У вихідному положенні рівноваги посадка судна характеризується наступними величинами: осадкою $T_0 \neq 0$, кутом крену $\theta_0 = 0$ і кутом диференту $\psi_0 = 0$. Після переносу вантажу параметри посадки судна приймають значення T_1, θ_1 і ψ_1 . В результаті з'являються наступні зміни параметрів посадки які потрібно визначити: $\delta T = T_1 - T_0$; $\delta \theta = \theta_1 - \theta_0$; $\delta \psi = \psi_1 - \psi_0$.

Початкова остійність судна як здатність протистояти дії кренувальних моментів характеризується коефіцієнтами поперечної і поздовжньої остійності Dh і DH , а також поперечною h і поздовжньою H метацентричними висотами.

При переносі вантажу маса судна не міняється, отже, не змінюється і вагова водотоннажність судна D . Тому вплив переносу вантажу на остійність реалізується шляхом зміни метацентричних висот, що у вихідному положенні рівноваги визначаються відомими виразами

$$h_0 = z_{C0} + r_0 - z_{G0}; \quad H_0 = z_{C0} + R_0 - z_{G0}.$$

Тут z_{C0} – апліката центра ваги зануреного об'єму корпусу судна; r_0 , R_0 – поперечний і поздовжній метацентричні радіуси відповідно; z_{G0} – апліката центра ваги судна.

Після переносу вантажу маємо

$$h_1 = z_{C1} + r_1 - z_{G1}; \quad H_1 = z_{C1} + R_1 - z_{G1}. \quad (8.1)$$

Нові метацентричні висоти обумовлюються появою їхніх збільшень, що визначаються виразами $\delta h = h_1 - h_0$; $\delta H = H_1 - H_0$.

Після підстановки в ці вирази значень метацентричних висот, знайдених за допомогою формул (8.1), вони перетворюються:

$$\delta h = \delta z_C + \delta r - \delta z_G; \quad \delta H = \delta z_C + \delta R - \delta z_G, \quad (8.2)$$

де через δz_C , δr , δR і δz_G позначаються відповідні збільшення величин z_C , r , R , і z_G , за допомогою яких повинні будуть знаходитись зміни характеристик остійності судна.

1.2. Перенос вантажу у вертикальному напрямку

При вертикальному переносі вантажу маса судна не змінюється, зміна відбувається з аплікатою його центра ваги: $z_{G1} = z_{G0} + \delta z_G$.

Склавши рівняння статичних моментів мас M і m відносно горизонтальної площини, що проходить через первісне положення центра ваги судна – точку G_0 з аплікатою z_{G0} , одержимо $M \delta z_G = m l_{pz}$. Звідси

$$\delta z_G = \frac{m l_{pz}}{M}.$$

При вертикальному переносі вантажу умови рівноваги судна на тихій воді не порушуються, об'єм зануреної частини корпусу судна не міняється. Тому при вертикальному переносі $\delta z_C = \delta r = \delta R = 0$.

Підставивши ці значення у формули для збільшень метацентричних висот (8.2), отримаємо

$$\delta h = -\delta z_G, \quad \delta H = -\delta z_G.$$

Узагальнюючи отримане, відзначимо, що вертикальний перенос вантажу не змінює посадку судна, але змінює його остійність. При переносі вантажу знизу вгору остійність зменшується, при переносі зверху вниз – збільшується. Після переносу коефіцієнтами остійності і метацентричними висотами стають величини Dh_1 , DH_1 і h_1 , H_1 .

1.3. Перенос вантажу в горизонтальній площині

При переносі вантажу в поперечному напрямку виникає кренувальний момент $M_p = p l_{py}$, який компенсується поперечним відновлювальним моментом.

Після врахування впливу вертикального переносу вантажу на остійність поперечний відновлювальний момент повинен визначатися за формулою

$$M_B = - Dh_1 \delta\theta.$$

З умови рівноваги судна при дії кренуючого моменту $M_B + M_p = 0$ знаходимо

$$\delta\theta = \frac{p l_{py}}{Dh_1}.$$

За допомогою отриманого збільшення кута крену $\delta\theta$ визначається осадка правого і лівого борта судна:

$$T_r = T - \frac{B}{2} \delta\theta; \quad T_l = T + \frac{B}{2} \delta\theta, \quad (8.3)$$

де $T = T_0 = T_1$ – осадка судна, B – його ширина.

Той же вантаж p при горизонтальному переносі у поздовжньому напрямку на відстань l_{px} створює диферентуючий момент $M_p = p l_{px}$.

Цей момент компенсується тепер поздовжнім відновлювальним моментом, значення якого при малих кутах $\delta\psi$ диференту визначається виразом $M_B = - DH_1 \delta\psi$.

Після компенсації диферентуючого моменту відновлювальним умова рівноваги судна на тихій воді $M_p + M_B = 0$ перетвориться в умову $p l_{px} = DH_1 \delta\psi$, з якої випливає

$$\delta\psi = \frac{p l_{px}}{DH_1}.$$

За допомогою отриманого збільшення кута диференту $\delta\psi$ визначається осадка носа і корми судна:

$$T_b = T_0 - \left(\frac{L}{2} + x_F \right) \delta\psi; \quad T_a = T_0 + \left(\frac{L}{2} - x_F \right) \delta\psi,$$

де x_F – абсциса центра ваги площі ватерлінії вихідного положення рівноваги судна; L – довжина судна (довжина між перпендикулярами).

В отриманих виразах для осадок носа і корми судна значенням його осадки, що фіксується в площині мідель-шпангоута, є величина

$$T = T_0 - x_F. \quad (8.4)$$

Тепер, коли судно поряд із креном має і диферент, його осадка повинна обчислюватися за формулою (8.4). Це обставина повинна бути врахована у виразах (8.3) при визначенні осадки лівого і правого бортів судна, а також при визначенні показань датчика осадки.

Таким чином, перенос вантажу в горизонтальній площині не змінює характеристики остійності, але змінює параметри посадки судна.

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Він такий ж, що і у ЛР № 5. Для даної ЛР (див. рис. 8.1) трюм I обладнан трьома вертикальними стрижнями (2, 3 і 4). Вантаж 5 може бути розміщений на кожному з цих стрижнів з фіксуванням положення по висоті. Вихідне положення вантажу вибирається на стрижні 2. У кінцевому положенні вантаж розміщається на стрижні 4. При виконанні ЛР вантаж переноситься з вихідного положення в кінцеве.

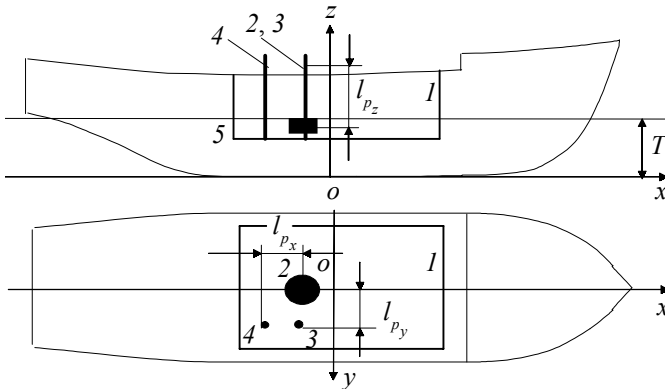


Рис. 8.1. Схема розміщення стрижнів для переносного вантажу

Перенос здійснюється поетапно, спочатку на стрижні 2 у вертикальному напрямку, потім зі стрижня 2 на стрижень 3 у поперечному напрямку і, нарешті, переноситься на стрижень 4 у поздовжньому напрямку.

Плічми переносу є величини $l_{pz} = z_{p1} - z_{p0}$ (вертикальний перенос вантажу); $l_{py} = y_{p1} - y_{p0}$ (поперечний перенос вантажу в горизонтальній площині); $l_{px} = x_{p1} - x_{p0}$ (поздовжній перенос вантажу в горизонтальній площині). Кути крену і диференту моделі, що при цьому виникають, реєструються гіроскопічним інклінометром, маятниковим кутоміром і, крім того, можуть бути визначені за допомогою марок осадки. На палубі моделі розташовані шпильки, на які надіваються вантажі кренбаласту, необхідні для проведення досліда кренування (див. рис. 5.2).

3. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою і її описом. Вивчити способи визначення посадки судна. Переміщенням рухливих вантажів на судні одержати "Посадку прямо і на рівний кіль", помістити переносний вантаж у вихідне положення. Визначити параметри посадки судна (див. ЛР №1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Визначити елементи зануреного об'єму корпусу судна (див. ЛР № 2) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Виконати дослід кренування для знаходження вихідного значення аплікати центра ваги моделі і вихідних значень метацентричних висот (див. ЛР № 5). Здійснити перенос вантажу у вертикальному напрямку. Виконати дослід кренування для визначення поправок до метацентричних висот. Визначити метацентричні висоти і аплікату центра ваги моделі (див. ЛР № 5). Перенести вантаж у поперечному напрямку. Визначити параметри посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Перенести вантаж у поздовжньому напрямку. Визначити параметри посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Порівняти отримані експериментальні значення характеристик посадки й остійності судна зі значеннями, отриманими розрахунковим шляхом. Оформити звіт про роботу.

Контрольні запитання

1. На які етапи умовно розділяється процес переносу вантажу на судні?
2. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при вертикальному переносі вантажу?
3. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при переносі вантажу в поперечному напрямку?

4. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при переносі вантажу в поздовжньому напрямку?

5. На яку величину змінюються метацентричні висоти при вертикальному переносі вантажу?

6. За якими формулами визначаються кут крену і кут диференту судна при переносі вантажу? Як виражаються через ці кути осадка лівого і правого бортів судна, а також осадка носа і корми?

Лабораторна робота № 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИЙОМУ (ЗНЯТТЯ) ВАНТАЖУ НА ПОСАДКУ І ПОЧАТКОВУ ОСТІЙНІСТЬ СУДНА

Мета роботи – вивчення впливу прийому чи зняття вантажу на характеристики посадки та остійності судна.

1. Теоретичні відомості

1.1. Поділ процесу прийняття вантажу на етапи

Передбачається, що судно знаходиться в положенні рівноваги на тихій воді і не має ні крену, ні диференту. Його сила ваги $\mathbf{D} = M\mathbf{g}$, де M – маса судна. При цьому умовами рівноваги судна (див. ЛР № 3) є рівність нулю суми всіх діючих сил та суми моментів усіх діючих сил:

$$\mathbf{D} + \rho V(-\mathbf{g}) = 0; \quad \mathbf{M}_D + \mathbf{M}_V = 0, \quad (9.1)$$

де V – об'єм зануреної частини корпусу судна.

Потім на судно приймається вантаж. Сила ваги вантажу дорівнює $\mathbf{p} = m \mathbf{g}$, де m – маса вантажу. У системі координат $oxyz$, зв'язаній з судном, координатами центра ваги прийнятого вантажу є величини x_p, y_p і z_p . Для того щоб визначати особливості впливу приймання вантажу на характеристики посадки судна і його остійності, процес прийому вантажу необхідно розділити на наступні три етапи:

на першому етапі вантаж розміщується на судні так, щоб воно не одержало ні крену, ні диференту. Увага, таким чином, зосереджується на дослідженні змін характеристик остійності (за даними ЛР № 4, на першому етапі приймання вантажу судно не одержить ні крену, ні диференту, якщо вантаж буде прийнято у точку з координатами $x_{p1} = x_F, y_{p1} = y_F = 0$;

$z_{p1} = z_p$, де x_F і $y_F = 0$ – координати центра ваги площі діючої ватерлінії судна);

на другому етапі прийому вантаж переміщається в поперечному напрямку в точку з координатами $x_{p2} = x_F$; $y_{p2} = y_p$; $z_{p2} = z_p$, що, згідно даним ЛР № 8, забезпечує визначення кута крену;

на третьому етапі здійснюється перенос вантажу в поздовжньому напрямку в точку з координатами $x_{p3} = x_p$; $y_{p3} = y_p$; $z_{p3} = z_p$, що завершує процес приймання вантажу в задане положення на судні.

1.2. Визначення характеристик посадки й остійності

У початковому положенні рівноваги посадка судна характеризується наступними величинами: середньою осадкою $T_0 \neq 0$, кутом крену $\theta_0 = 0$ і кутом диференту $\psi_0 = 0$. Після приймання вантажу параметри посадки судна приймають значення T_1 , θ_1 і ψ_1 . У результаті мають місце наступні зміни параметрів посадки: $\delta T = T_1 - T_0$, $\delta \theta = \theta_1 - \theta_0$, $\delta \psi = \psi_1 - \psi_0$, що повинні бути визначені.

У положенні рівноваги початкова остійність судна характеризується коефіцієнтами поперечної і поздовжньої остійності Dh_0, DH_0 , а також поперечною і поздовжньою метацентричними висотами h_0, H_0 .

Після приймання вантажу характеристиками остійності стають величини $(D + p) h_1$, $(D + p) H_1$ і h_1, H_1 відповідно. Тому вплив приймання вантажу на остійність визначається не тільки зміною водотоннажності судна, але і зміною його метацентричних висот.

У вихідному положенні рівноваги метацентричні висоти будуть:

$$h_0 = z_{C0} + r_0 - z_{G0}; \quad H_0 = z_{C0} + R_0 - z_{G0}.$$

Тут z_{C0} – апліката центра ваги зануреного об'єму корпусу судна; r_0, R_0 – поперечний та поздовжній метацентричні радіуси; z_{G0} – апліката центра ваги судна.

Після прийому вантажу

$$h_1 = z_{C1} + r_1 - z_{G1}; \quad H_1 = z_{C1} + R_1 - z_{G1}.$$

Нові значення метацентричних висот обумовлюються появою їхніх збільшень $\delta h = h - h_0$, $\delta H = H_1 - H_0$. Використовуючи відому теорему про збільшення, одержимо:

$$\delta h = \delta h_C + \delta r - \delta z_G; \quad \delta H = \delta z_C + \delta R - \delta z_G,$$

де через δz_C , δr , δR і δz_G позначаються відповідні припущення величин z_C , r , R , і z_G , за допомогою яких повинні будуть визначитися зміни характеристик остійності судна.

1.3. Перший етап приймання вантажу

Зміна характеристик посадки судна. При прийомі на судно вантажу (див. рис. 4.1), сила ваги якого дорівнює $\mathbf{p}$, вага судна збільшується і стає рівною $D_1 = D + p$. Оскільки $D_1 = \rho g V_1$ і $D = \rho g V$, то $p = \rho g(V_1 - V) = \rho g \delta V$. Тут δV – збільшення об'ємної водотоннажності, що компенсує прийом вантажу p .

Якщо вантаж вагою p буде знятий з судна, то p потрібно взяти зі знаком мінус. Тоді різниця $(V_1 - V)$ також буде від'ємною і стане показувати, наскільки зменшилася об'ємна водотоннажність.

Зміна об'ємної водотоннажності судна відбувається за рахунок зміни осадки $\delta T = T_1 - T_0$. Якщо вантаж малий, то в межах зміни осадки борта судна можна вважати прямими і додатковий об'єм корпусу, що ввійшов у воду, обчислювати за наближеною формулою $\delta V = S \delta T$, де S – площа вихідної ватерлінії. Тоді $p = \rho g S \delta T$, що дозволяє визначити збільшення осадки судна:

$$\delta T = \frac{p}{\rho g S}.$$

Таким чином, характеристиками посадки судна після першого етапу приймання вантажу є величини:

$$T_1 = T_0 + \delta T; \quad \theta_1 = \theta_0 + \delta \theta = 0; \quad \psi_1 = \psi_0 + \delta \psi = 0,$$

Зміна характеристик остійності. Зміна об'єму зануреної у воду частини корпусу судна, що викликана прийомом вантажу, спричиняє зміну координат центра ваги цього об'єму.

Визначивши статичні моменти об'ємів δV , V і $(V + \delta V)$ відносно горизонтальної площини, що проходить через центр ваги об'єму V , одержимо $(V + \delta V) \delta z_C = \delta V \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - z_{C0} \right)$. Звідси

$$\delta z_C = \frac{\delta V}{V + \delta V} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - z_{C0} \right).$$

Зміна зануреного об'єму викликає збільшення метацентричних радіусів, що визначаються формулами

$$\delta r = r_1 - r_0 = \frac{I_{x1}}{V - \delta V} - \frac{I_{x0}}{V} \cong -\frac{\delta V}{V + \delta V} r_0;$$

$$\delta R = R_1 - R_0 = \frac{I_{F1}}{V + \delta V} - \frac{I_{F0}}{V} \cong -\frac{\delta V}{V + \delta V} R_0.$$

Прийом вантажу на судно викликає збільшення аплікати його центра ваги. Визначивши статичні моменти мас m , M і $(M + m)$ відносно горизонтальної площини, що проходить через центр ваги судна у вихідному положенні рівноваги, одержимо $(M + m)\delta z_G = m(z_p - z_{G0})$.

Звідси

$$\delta z_G = \frac{m}{M + m} (z_p - z_{G0}).$$

Підсумовуючи тепер отримані результати, знаходимо наступні вирази для збільшень метацентричних висот:

$$\delta h = \frac{p}{D + p} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - h_0 + z_p \right); \quad \delta H = \frac{p}{D + p} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - H_0 + z_p \right).$$

Таким чином, після реалізації першого етапу приймання вантажу характеристики остійності визначаються залежностями

$$h_1 = h_0 + \delta h, \quad H_1 = H_0 + \delta H; \quad (D + p)h_1 = D h_0 + p \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} + z_p \right);$$

$$(D + p)H_1 = D H_0 + p \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} + z_p \right),$$

з яких випливає, що остійність судна залишиться незмінною, тобто буде визначатися коефіцієнтами остійності Dh_0 і DH_0 , якщо вантаж буде прийнятий на рівень $z = T_0 + \frac{\delta T}{2}$. Цей рівень визначає горизонтальну площину, що знаходиться поблизу площини ватерлінії вихідного положення рівноваги судна. У зв'язку з тим, що прийняття вантажу нижче рівня

$z = T_0 + \frac{\delta T}{2}$ призводить до збільшення остійності, а прийом вантажу вище цього рівня – до її зниження, ця площа називається нейтральною.

1.4. Другий етап прийому вантажу

На другому етапі вантаж переноситься в поперечному напрямку горизонтально на відстань $l_{py} = y_p - y_F = y_p$. При цьому виникає момент, що кренить, $M_p = p l_{py}$, який компенсується поперечним відновлювальним моментом. Після врахування впливу прийому вантажу на остійність поперечний відновлювальний момент повинен визначатися формулою $M_B = -(D + p)h_1\delta\theta$. Тоді, з умови рівноваги судна при дії кренувального моменту $M_B + M_p = 0$, знаходимо

$$\delta\theta = \frac{pl_{py}}{(D + p)h_1}.$$

За допомогою отриманого збільшення кута крену $\delta\theta$ визначається осадка правого і лівого бортів судна:

$$T_r = T_1 - \frac{B}{2}\delta\theta; \quad T_l = T_1 + \frac{B}{2}\delta\theta, \quad (9.2)$$

де T_1 – осадка судна, B – його ширина.

1.5. Третій етап приймання вантажу

На третьому етапі вантаж переноситься в поздовжньому напрямку горизонтально на відстань $l_{px} = x_p - x_F$. Перенос вантажу створює диферентуючий момент M_p , величина якого дорівнює $M_p = pl_{px}$.

Цей момент компенсується тепер поздовжнім спрямляючим моментом, значення якого при малих кутах $\delta\psi$ диференту визначається виразом $M_B = -(D + p)H_1\delta\psi$.

Після компенсації диферентуючого моменту відновлювальним моментом умова рівноваги судна на тихій воді $M_p + M_B = 0$ перетвориться

на наступну умову: $pl_{px} = (D + p)H_1\delta\psi$, з якої випливає, що $\delta\psi = \frac{pl_{px}}{(D + p)H_1}$.

За допомогою отриманого збільшення кута диференту $\delta\psi$ визначається осадка носа і корми судна:

$$T_b = T_1 - \left(\frac{L}{2} + x_F \right) \delta\psi, \quad T_a = T_1 + \left(\frac{L}{2} - x_F \right) \delta\psi,$$

де x_F – абсциса центра ваги площі ватерлінії вихідного положення рівноваги судна; L – довжина судна (довжина між перпендикулярами).

В отриманих виразах значенням осадки судна, що фіксується в площині мідель-шпангоута, є величина

$$T = T_1 - x_F \delta\psi. \quad (9.3)$$

Тепер, коли судно поряд із креном має і диферент, його осадка повинна обчислюватися за формулою (9.3). Ця обставина повинна бути врахована у виразах (9.2) при визначенні осадки лівого і правого бортів судна, а також при визначенні показань датчика осадки.

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Повний склад установки приведений у розд. 1. При виконанні даної лабораторної роботи використовуються: переносні вантажі; марки заглиблення; блок живлення датчика середньої осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики середньої осадки і кутів нахилу моделі; ПК з аналогово-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

Особливості експериментальної установки для даної ЛР: модель судна (рис. 9.1) має трюм 1, обладнаний трьома вертикальними стрижнями 2, 3 і 4; вантаж 5 може бути розміщений на кожному з цих стрижнів з фіксованим положенням по висоті z_p ; вантаж приймається на стрижень 4 у точку з координатами x_p , y_p і z_p .

При виконанні лабораторної роботи процес прийому вантажу розбивається на етапи. У першому етапі він приймається на стрижень 2, розташований поблизу центра ваги ватерлінії вихідного положення рівноваги моделі судна. Прийом здійснюється на висоту z_p . На другому етапі вантаж переноситься в поперечному напрямку на штир 3. Висота його положення зберігається рівною z_p . На третьому етапі вантаж переміщається на штир 4, його положення на висоті штиря зберігається.

Кути крену і диференту моделі, що виникають при переносі вантажу, реєструються гіроскопічним інклінометром, кутоміром маятникового типу і, крім цього, можуть бути визначені за допомогою марок осадки. На палубі моделі розташовані шпильки, на яких розміщено вантажі кренбаласту, необхідні для дослідження кренування (див. рис. 5.2)

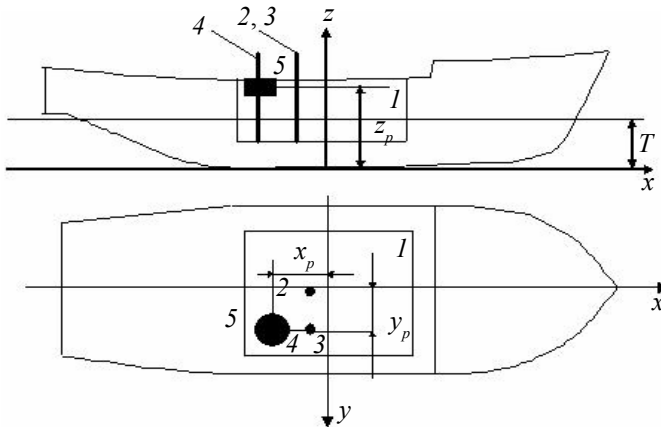


Рис. 9.1. Схема розміщення стрижнів для прийнятого ванта

3. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою і її описом. Вивчити способи визначення посадки судна. Переміщенням рухомих вантажів на судні одержати "Посадку прямо і на рівний кіль". Обчислити значення параметрів посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Визначити елементи зануреного об'єму корпусу судна (див. ЛР № 2) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Виконати дослід кренування для визначення вихідного значення аплікати центра ваги моделі та вихідних значень метацентричних висот (див. ЛР № 5). Здійснити прийом вантажу на стрижень 2. Виконати дослід кренування. Визначити метацентричні висоти і аплікату центра ваги моделі (див. ЛР № 5). Перенести вантаж у поперечному напрямку. Визначити параметри посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Перенести вантаж у поздовжньому напрямку. Визначити параметри посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Порівняти експериментальні значення характеристик посадки й остій-

ності судна зі значеннями, отриманими розрахунковим шляхом. Оформити звіт про роботу.

Контрольні запитання

1. На які етапи умовно поділяється процес прийому вантажу?
2. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при прийомі вантажу на вертикаль, що проходить через центр ваги площі ватерлінії?
3. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при переносі вантажу в поперечному напрямку?
4. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при переносі вантажу в поздовжньому напрямку?
5. Якими формулами визначаються метацентричні висоти і коефіцієнти остійності при прийомі вантажу?
6. Що називається нейтральною площиною?
7. За якими формулами визначаються кути крену і диференту судна при переносі вантажу?
8. Як виражається через ці кути осадка лівого і правого бортів судна, а також осадка носа і корми?

Лабораторна робота № 10

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГРАМИ СТАТИЧНОЇ ОСТІЙНОСТІ СУДНА

Мета роботи – встановлення дослідним шляхом залежності плеча статичної остійності судна від кута крену; визначення розрахунковим шляхом значень пліч динамічної остійності судна; вивчення впливу переносу вантажу в поперечній площині на остійність судна при великих нахилах.

1. Теоретичні положення

1.1. Діаграми статичної та динамічної остійності судна

Діаграма статичної остійності – графік залежності плеча статичної остійності $l(\theta)$ і відновлювального моменту $M_B = l(\theta)D$ від кута θ крену – є характеристикою остійності судна при великих нахилах. При цьо-

му крутість початкової гілки діаграми h_0 , максимальне значення $l_{\max}$ плеча статичної остійності $l(\theta)$, відповідний максимальному значенню плеча кут крену $\theta_{\max}$, кут заочування діаграми θ_v , при якому спадна гілка діаграми перетинає вісь абсцис, а також обмежена кривою $l(\theta)$ і віссю абсцис площа діаграми $d_{\max}$ – найважливіші елементи, що характеризують діаграму статичної остійності.

Плече динамічної остійності судна $d(\theta)$ визначається через його плече статичної остійності $l(\theta)$ за допомогою формули

$$d(\theta) = \int_0^{\theta} l(\varphi) d\varphi. \quad (10.1)$$

Робота відновлювального моменту $A_B(\theta)$ виражається через плече динамічної остійності за допомогою співвідношення $A_B(\theta) = D d(\theta)$.

Таким чином, маючи діаграму статичної остійності, можна за допомогою формули (10.1) одержати значення пліч $d(\theta)$ динамічної остійності судна і побудувати діаграму динамічної остійності.

1.2. Вплив переносу вантажу на діаграму остійності

На форму діаграми статичної остійності і значення її елементів впливає перенос вантажу p у поперечній площині судна, що викликає зміну положення центра ваги судна:

$$\delta y_G = \frac{P}{D} l_y; \quad \delta z_G = \frac{P}{D} l_z, \quad (10.3)$$

де D – водотоннажність судна; l_y і l_z – проекції на відповідні осі переміщень центра ваги вантажу, обумовлені початковим (до переносу) y_{p0} , z_{p0} і кінцевим (після переносу) y_{p1} , z_{p1} положеннями:

$$l_y = y_{p1} - y_{p0}; \quad l_z = z_{p1} - z_{p0}. \quad (10.4)$$

Зміна δl плеча статичної остійності судна l_0 і його нове (після переносу вантажу) значення l_1 визначаються так:

$$\delta l = -(\delta y_G \cos \theta + \delta z_G \sin \theta); \quad l_1 = l_0 + \delta l, \quad (10.5)$$

де θ – кут крену; l_0 – плече статичної остійності до переносу вантажу.

2. Експериментальна установка

На рис. 10.1 представлено схему експериментальної установки для визначення ординат діаграми статичної остійності моделі судна, в якій реалізується можливість створення кренувального моменту M_G , що діє на модель і не залежить від кута крену. Водотоннажність судна D залишається в процесі нахилень моделі постійною.

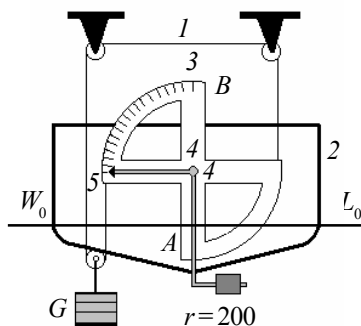


Рис. 10.1. Схема установки для кренування моделі

Момент M_G створюється за допомогою вантажу вагою G , зв'язаного тросом l із жорстко закріпленою на моделі 2 поперечною рамою 3, здатною обертатися навколо горизонтальної осі 4, що є поздовжньою віссю обертання моделі. На ободі частини рами у формі двох чвертей кола радіусом $r = 200$ мм є жолоби, в яких розташовуються гілки троса l , закріплені в точках A і B . У такий спосіб створюється кренувальний момент, що діє на модель, величина якого $M_G = r G$ не залежить від кута крену θ в межах від нуля до 90° . При цьому кути крену заміряють за допомогою закріпленої на осі 4 стрілки 5.

Визначення ординат діаграми статичної остійності ґрунтується на факті, що в положенні рівноваги судна під дією пари сил кренувальний момент дорівнює відновлювальному: $M_B = M_G$. Звідси $l = M_G/D$.

Якщо незалежний від кута θ кренувальний момент M_p задовольняє

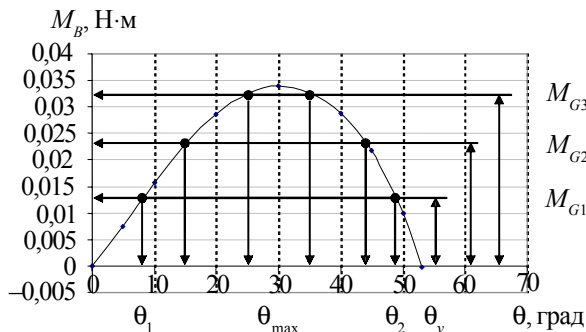


Рис. 10.2. Положення рівноваги моделі при дії кренувального моменту

умові $M_G < D l_{\max}$, де $l_{\max}$ – максимальне значення плеча статичної остійності при $\theta = \theta_{\max}$, то таких положень рівноваги два. Одне з них, при $\theta_1 < \theta_{\max}$, що відповідає висхідній гілці діаграми, є стійким, а інше, при $\theta > \theta_{\max}$, що відповідає спадній гілці, – нестійким (рис. 10.2).

Визначення кута θ_1 за допомогою експериментальної установки утруднень не викликає. Для визначення кута θ_2 модель необхідно вручну нахилити на кут $\theta > \theta_2$, а потім, повільно випрямляючи її, установити в такому положенні, при переході через яке вона мимоволі прагне випрямитися. Зазначене положення і визначить кут θ_2 .

3. Порядок виконання роботи

Ознайомитися з принципом роботи установки. Закріпити вантаж p у визначеному положенні на одному зі стрижнів у трюмі моделі. Значення ваги p і координат центра ваги y_{p0}, z_{p0} вантажу занести до протоколу досліджень. Зробити визначення ординат діаграми статичної остійності моделі судна. Для цього, поступово збільшуючи величину вантажу G установки, виміряти кути θ_2 і θ_1 , а також відповідні кренувальні моменти та занести їх до протоколу досліджень. Перенести вантаж p у точку з координатами y_{p1}, z_{p1} . Занести значення цих координат до протоколу досліджень. Повторити визначення ординат діаграми статичної остійності моделі судна. Результати нових вимірів теж занести до протоколу досліджень. Оформити звіт про виконану роботу.

4. Обробка результатів дослідів й оформлення звіту

Звіт повинен включати: вступ, що пояснює мету і суть ЛР; протоколи замірюваних величин θ_1 і θ_2 в залежності від G при двох фіксованих положеннях вантажу p ; діаграми статичної остійності для кожного положення вантажу p (друга діаграма повинна бути побудована як на основі безпосередніх вимірів пліч статичної остійності, так і за допомогою формул (10.3)–(10.5) розрахунковим шляхом – за методом трапецій для розрахунку інтеграла зі змінною верхньою межею (10.1) при кроці інтегрування $\delta\theta = 5^\circ$); діаграму динамічної остійності в спільних осях із діаграмою статичної остійності; висновки.

Контрольні запитання

1. Що є характеристикою остійності судна при великих нахилах?
2. Що називається плечами статичної та динамічної остійностей?
3. За якою формулою обчислюється робота відновлювального моменту?
4. Що називається діаграмою статичної остійності та діаграмою динамічної остійності?

5. Як побудувати діаграму динамічної остійності, якщо відома діаграма статичної остійності?

6. Як побудувати діаграму статичної остійності, діючи на судно послідовністю кренувальних моментів?

7. Як впливає перенос вантажу на судні у вертикальному і горизонтальному напрямках на діаграму статичної остійності?

Лабораторна робота № 11

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАВУЧОСТІ ТА ОСТІЙНОСТІ АВАРІЙНОГО СУДНА

Мета роботи – вивчення впливу затоплення однієї чи декількох цистерн на посадку й остійність судна; оволодіння навичками ведення розрахунків посадки й остійності аварійного судна і призначення інженерних рішень з випрямлення судна.

1. Теоретичні відомості

Для забезпечення непотоплюваності судна та раціонального використання його запасів плавучості й остійності непроникний корпус судна розділяється міцними поперечними і поздовжніми перегородками на відсіки. В результаті аварії один чи декілька відсіків можуть бути затоплені.

У залежності від рівня затоплення відсіку і від того, сполучається він чи ні з забортною водою і повітрям, відсіки поділяються на три категорії: ті, що затоплені водою повністю; затоплені частково і не мають сполучення з забортною водою; затоплені частково і мають повітряне і водяне сполучення з зовнішнім середовищем.

Якщо на судні затоплено один відсік (одиночне затоплення), то розрахунок параметрів плавучості й остійності аварійного судна може бути проведено одним із двох методів: методом прийому вантажу (змінної водотоннажності); методом виключення (постійної водотоннажності).

Найчастіше перший метод використовують для розрахунку плавучості й остійності аварійного судна при затопленні відсіків першої чи другої категорії, а метод виключення – при затопленні відсіків третьої категорії.

Сутність методу прийому вантажу полягає в тому, що вода, яка надійшла у відсік, вважається прийнятим малим вантажем, сила ваги яко-

го дорівнює p , і координатами центра ваги вантажу в системі координат $oxuz$, пов'язаної з судном, є величини x_p, y_p, z_p .

1.1. Розрахунок непотоплюваності методом прийому вантажу

Скористаємося цим методом для визначення характеристик посадки й остійності судна при затопленні відсіку другої категорії. Вода, що потрапила у відсік другої категорії, має вільну поверхню. Центральні моменти інерції площі вільної поверхні води у відсіку, обчислені відносно поздовжньої та поперечної осей, позначимо через i_x і i_y .

Крім цього, позначимо наступні дані по судну: L – довжина; T_0 – осадка; T_b – осадка носом; T_a – осадка кормою; S – площа ватерлінії; x_F – абсциса центра ваги площі ватерлінії; D – сила ваги судна; x_G, y_G, z_G – координати центра ваги судна; V – об'єм зануреної частини корпусу судна; x_C, y_C, z_C – координати центра ваги зануреного об'єму корпусу судна; h_0, H_0 – поперечна і поздовжня метacentричні висоти, а також по відсіку: p – вага рідини у відсіку; i_x, i_y – центральні моменти інерції площі вільної поверхні рідини; x_p, y_p, z_p – координати центра ваги води у відсіку.

Розрахунок характеристик посадки й аварійної остійності судна виконаємо за формулами, наведеними у попередніх лабораторних роботах, у наступній послідовності.

Зміну середньої осадки визначимо за формулою

$$\delta T = \frac{P}{\rho g S}.$$

Зміну координат центра ваги судна за рахунок прийому рідини у відсік і зміни координат центра ваги зануреного об'єму корпусу судна шляхом занурення корпусу обчислимо наступним чином:

$$\delta x_G = \frac{P}{D + p}(x_p - x_G); \quad \delta y_G = \frac{P}{D + P}(y_p); \quad \delta z_G = \frac{P}{D + P}(z_p - z_G);$$

$$\delta x_C = \frac{\delta V}{V + \delta V}(x_F - x_C); \quad \delta y_C = 0; \quad \delta z_C = \frac{\delta V}{V + \delta V} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - z_C \right).$$

Координати центра ваги судна і центра ваги зануреного об'єму корпусу судна визначимо за допомогою залежностей:

$$x_{G1} = x_G + \delta x_G; \quad y_{G1} = y_G + \delta y_G; \quad z_{G1} = z_G + \delta z_G;$$

$$x_{C1} = x_C + \delta x_C; \quad y_{C1} = y_C + \delta y_C; \quad z_{C1} = z_C + \delta z_C.$$

Зміни поперечної та поздовжньої метацентричних висот визначимо за формулами

$$\delta h = \frac{p}{D+p} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - h_0 - z_p \right); \quad \delta H = \frac{p}{D+p} \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - H_0 - z_p \right).$$

Метацентричні висоти і коефіцієнти остійності аварійного судна знайдемо за допомогою співвідношень

$$h_1 = h_0 + \delta h, \quad H_1 = H_0 + \delta H, \quad (D+P)h_1 = Dh_0 + p \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - z_p \right),$$

$$(D+P)H_1 = DH_0 + p \left(T_0 + \frac{\delta T}{2} - z_p \right).$$

Збільшення кутів крену і диференту визначимо за допомогою формул

$$\delta \theta = \frac{pl_{py}}{(D+p)h_1}; \quad l_{py} = y_p - y_F = y_p; \quad \delta \psi = \frac{pl_{px}}{(D+p)H_1}; \quad l_{px} = x_p - x_F.$$

Значення осадок носа і корми:

$$T_b = T_1 - \left(\frac{L}{2} + x_F \right) \delta \psi; \quad T_a = T_1 - \left(\frac{L}{2} - x_F \right) \delta \psi; \quad T_1 = T_0 + \delta T.$$

1.2. Розрахунок непотоплюваності методом виключення

При виключенні затопленого відсіку з об'єму зануреної частини корпусу судна у воду входить об'єм корпусу між первісною й аварійною ватерлініями, який дорівнює об'єму води, що потрапила у відсік. При цьому зміна форми зануреної частини корпусу судна, викликана виключенням відсіку, супроводжується переміщенням об'єму, зайнятого водою у відсіку, у додатковий об'єм ушкодженого корпусу, що входить у воду. Водотоннажність судна залишається незмінною (постійною).

Розрахунок непотоплюваності методом виключення (постійної во-

дотоннажності) полягає у визначенні характеристик аварійної посадки й остійності на основі зазначеної зміни форми зануреної у воду частини корпусу судна.

Для виконання розрахунку повинні бути відомі значення наступних характеристик неушкодженого судна: L – довжина; T_0 – осадка; T_b – осадка носом; T_a – осадка кормою; S – площа ватерлінії; x_F – абсциса центра ваги площі ватерлінії; I_x – центральний момент інерції площі ватерлінії, обчислений відносно поздовжньої осі; I_F – центральний момент інерції площі ватерлінії, обчислений відносно поперечної осі; D – сила ваги судна; x_G, y_G, z_G – координати центра ваги судна; V – об'єм зануреної частини корпусу судна; x_C, y_C, z_C – координати центра ваги зануреного об'єму корпусу судна; r, R – поперечний і поздовжній метacentричні радіуси, h_0, H_0 – поперечна і поздовжня метacentричні висоти, а також наступні характеристики затопленого відсіку: p – вага рідини у відсіку; x_p, y_p, z_p – координати центра ваги рідини у відсіку; s – втрачена площа ватерлінії (площа вільної поверхні рідини у відсіку); i_x, i_y, i_{xy} – моменти інерції (осьові та відцентровий) втраченої площі ватерлінії; x_s, y_s – координати центра ваги втраченої площі ватерлінії.

Розрахунок непотоплюваності ведеться у наступній послідовності.

Збільшення осадки судна за умови прямистинності його корпусу в районі ватерлінії обчислюється за формулою

$$\delta T = \frac{P}{\rho g(S-s)}.$$

Координати центра ваги площі аварійної ватерлінії визначаються за допомогою виразів

$$x_{F1} = x_F - (x_s - x_F) \frac{s}{S-s}; \quad y_{F1} = -y_s \frac{s}{S-s}.$$

Моменти інерції (осьові та відцентровий) площі аварійної ватерлінії відносно центральних поздовжньої і поперечної осей дорівнюють:

$$I_{x1} = I_x - i_x - s y_s^2 \left(1 + \frac{s}{S-s} \right); \quad I_{F1} = I_F - i_y - s (x_s - x_F)^2 \left(1 + \frac{s}{S-s} \right);$$

$$I_{x1F1} = -i_{xy} - s (x_s - x_F) y_s \left(1 + \frac{s}{S-s} \right).$$

Метацентричні радіуси та їх збільшення визначаються за залежностями

$$r_1 = \frac{I_{x_1}}{V}; \quad R_1 = \frac{I_{F_1}}{V}; \quad \delta r = -\frac{1}{V} \left[i_x + s y_s^2 \left(1 + \frac{s}{S-s} \right) \right];$$

$$\delta R = -\frac{1}{V} \left[i_y + s(x_s - x_F)^2 \left(1 + \frac{s}{S-s} \right) \right].$$

Зміни координат центра ваги зануреного об'єму корпусу судна, викликані зміною зануреного об'єму, у першому наближенні – за умов відсутності крену і диференту визначаються за формулами

$$\delta x_{C_1} = -\frac{p}{D}(x_p - x_{F_1}); \quad \delta y_{C_1} = -\frac{p}{D}(y_p - y_{F_1}); \quad \delta z_{C_1} = -\frac{p}{D} \left(z_p - T_0 - \frac{\delta T}{2} \right).$$

У другому наближенні збільшення координат центра ваги зануреного об'єму корпусу судна, обумовлені нахилами судна, визначаються за виразами

$$\delta x_{C_2} = \frac{I_{F_1}}{V} \delta \psi + \frac{I_{x_1 F_1}}{V} \delta \theta; \quad \delta y_{C_2} = \frac{I_{x_1}}{V} \delta \theta + \frac{I_{x_1 F_1}}{V} \delta \psi; \quad \delta z_{C_2} = 0.$$

Сумарні збільшення координат центра ваги зануреного об'єму корпусу судна в другому наближенні стають рівними:

$$\delta x_C = \delta x_{C_1} + \delta x_{C_2}; \quad \delta y_C = \delta y_{C_1} + \delta y_{C_2}; \quad \delta z_C = \delta z_{C_1} + \delta z_{C_2}.$$

Збільшення поперечної та поздовжньої метацентричної висот обчислюються за формулами

$$\delta h = \delta z_C + \delta r; \quad \delta H = \delta z_C + \delta R,$$

а нові метацентричні висоти – за допомогою виразів

$$h_1 = h_0 + \delta h; \quad H_1 = H_0 + \delta H.$$

Збільшення кутів крену і диференту у припущенні про те, що головні центральні осі аварійної ватерлінії рівнобіжні центральним осям неущкодженої ватерлінії і центр ваги втраченої площі ватерлінії лежить на

одній вертикалі з центром ваги відсіку, обчислюються за співвідношеннями:

$$\delta\theta = \frac{py_p}{Dh_1} \left(1 + \frac{s}{S-s} \right); \quad \delta\psi = \frac{p(x_p - x_{F_1})}{DH_1} \left(1 + \frac{s}{S-s} \right).$$

Зміни осадок носом і кормою, а також їх нові значення знаходяться за допомогою виразів

$$T_b = T_1 - \left(\frac{L}{2} + x_F \right) \delta\psi; \quad T_a = T_1 + \left(\frac{L}{2} - x_F \right) \delta\psi; \quad T_1 = T_0 + \delta T.$$

1.3. Порівняння результатів розрахунків, отриманих при використанні методу прийому вантажу і методу постійної водотоннажності

Значення величин, що характеризують положення судна після затоплення відсіку: середньої осадки, кутів крену і диференту, а також коефіцієнтів остійності – не залежать від способу розрахунку. Складові коефіцієнтів остійності – водотоннажності і метацентричні висоти – приймають різні значення. Так, метацентричні висоти, отримані методом прийому, будуть менше тих, що визначені за методом виключення.

1.4. Розрахунок непотоплюваності при затопленні декількох відсіків

При затопленні декількох відсіків параметри посадки й остійності аварійного судна можуть бути отримані або за методом еквівалентного відсіку (коли група відсіків замінюється одиночним фіктивним зі спеціальним чином підібраними параметрами), або за методом накладення (лінійної суперпозиції). При використанні методу накладення зміни посадки й остійності судна від затоплення кожного з відсіків у припущенні про те, що всі інші не затоплені, сумуються.

2. Склад експериментальної установки для виконання лабораторної роботи

Установка в цілому подана у розд. 1. При виконанні даної лабораторної роботи використовуються: переносні вантажі; носова і кормова

цистерни; марки заглиблення; блок живлення датчика середньої осадки і гіроскопічного інклінометра; датчики середньої осадки і кутів нахилу моделі; ПК з аналого-цифровим перетворювачем; програма "Експериментальні виміри"; принтер.

Особливості експериментальної установки для даної ЛР. На моделі судна (див. рис. 12.1) розміщено дві цистерни – носову 1 і кормову 2, що при дослідженні заповнюються рідиною. Кути крену і диференту моделі, що виникають при прийомі рідини до цистерн, реєструються гіроскопічним інклінометром, маятниковим кутоміром і, крім цього, можуть бути визначені за допомогою марок осадки.

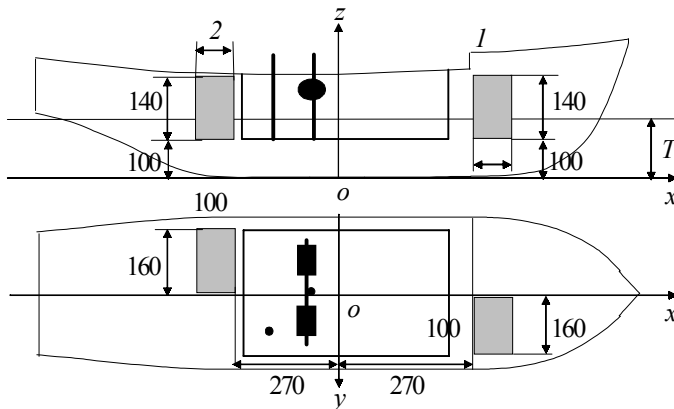


Рис. 12.1. Схема розміщення цистерн

На палубі моделі розташовані шпильки, на які під час проведення досліду кренування надіваються вантажі кренбаласту (див. рис. 5.2).

3. Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з експериментальною установкою і її описом. Вивчити способи визначення посадки судна. Переміщенням рухомих вантажів на судні одержати "Посадку прямо і на рівний кіль". Визначити параметри посадки судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Визначити елементи зануреного об'єму корпусу судна (див. ЛР № 2) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Виконати дослід кренування для обчислення вихідного значення аплікати центра ваги моделі та вихідних значень метacentричних висот (див. ЛР № 5). Вибрати одну з цистерн. Влити в неї воду. Визначи-

ти вагу, координати центра ваги і характеристики вільної поверхні рідини в цистерні. Зафіксувати їх значення в протоколі експериментальних досліджень.

Визначити параметри посадки аварійного судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Виконати дослід кренування аварійного судна. Знайти метацентричні висоти і аплікату центра ваги моделі з затопленим відсіком (див. ЛР № 5).

Вибрати метод розрахунку непотоплюваності. Порівняти отримані експериментальні значення характеристик посадки й остійності аварійного судна зі значеннями, отриманими розрахунковим шляхом. Розрахувати кількість рідкого баласту для випрямлення моделі судна та залишковий кут крену і коефіцієнт остійності спрямленого судна.

Провести випрямлення аварійного судна контрзатопленням відсіку. Зафіксувати параметри контрзатоплюваного відсіку в протоколі експериментальних досліджень. Визначити параметри посадки спрямленого судна (див. ЛР № 1) і зафіксувати їх у протоколі експериментальних досліджень. Виконати дослід кренування спрямленого судна. Визначити метацентричні висоти й аплікату центра ваги моделі з контрзатопленим відсіком (див. ЛР № 5). Порівняти отримані експериментальні значення характеристик посадки й остійності спрямленого судна зі значеннями, отриманими розрахунковим шляхом. Видалити воду з цистерн. Оформити звіт про роботу.

4. Обробка результатів експерименту й оформлення звіту про роботу

Звіт повинен містити: вступ, що пояснює мету і суть лабораторної роботи; схему розташування затоплюваного і контрзатоплюваного відсіків із фіксацією кількості й координат центра ваги прийнятої рідини, розмірів вільних поверхонь; приладові записи осадки і кутів нахилу моделі або ці ж дані, отримані за допомогою марок осадки і маятникового кутоміра; розрахунки метацентричних висот, коефіцієнтів остійності й кутів крену моделі до і після прийому рідини до цистерни; порівняння розрахункових значень із зафіксованими в експерименті до і після прийому рідини; розрахунок контрзатоплення і підбір потрібної кількості рідини в контрвідсіку; розрахунок посадки й остійності моделі судна після випрямлення; порівняння розрахункових та експериментальних даних; висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Що називається непотоплюваністю судна і на які категорії поділяються затоплювані відсіки?
2. Які існують методи розрахунку непотоплюваності судна і в чому їх різниця?
3. Які характеристики посадки й остійності судна змінюються при затопленні відсіку?
4. Якими формулами визначаються метацентричні висоти і коефіцієнти остійності при розрахунках непотоплюваності методом прийому вантажу і методом постійної водотоннажності?
5. За якими формулами визначаються збільшення середньої осадки, кути крену і диференту судна при розрахунку різними методами?
6. Як виражаються через ці кути осадка лівого і правого бортів судна, а також осадка носа і корми?
7. Як розраховується непотоплюваність судна при затопленні декількох відсіків?

Розділ 3. ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ РОБОТИ З ПЕРСОНАЛЬНИМ КОМП'ЮТЕРОМ

3.1. Послідовність роботи з персональним комп'ютером

Ознайомтеся з експериментальною установкою та її описом.

Увімкніть блок електроживлення осадкоміра і гіроскопічного інклінометра. Протягом тридцяти хвилин буде стабілізуватися режим роботи осадкоміра. Для стабілізації режиму роботи гіроскопічного інклінометра достатньо зачекати п'ять хвилин.

Увімкніть ПК. Стартуйте програму "Експериментальні виміри". Натисніть кнопку "Вимір" у відкритому головному меню програми і перегляньте інформацію ПК про вимір осадки, кутів крену і диференту моделі судна (рис. 1–3).

Приведіть модель судна у положення "Вертикально і на рівний киль" переносом та регулюванням вантажів.

Виконайте регулювання і калібрування осадкоміра та гіроскопічного інклінометра за допомогою марок осадки і механічного інклінометра.

Виконайте необхідні виміри. Для реєстрації цих вимірів клацніть кнопку "Запис вимірів" у відкритому головному меню програми "Експериментальні виміри", потім кнопку "Запис" (рис. 4).

Маючи запис виміру, перегляньте його в операційному вікні "Перегляд запису" (рис. 5).

Надрукуйте запис виміру, що знаходиться на екрані ПК, до протоколу автоматизованих експериментальних досліджень (рис. 6–7).

Рис. 1. Головне меню програми "Експериментальні виміри", вимір диференту, регулювання і калібрування показань датчика кутів диференту

Рис. 2. Головне меню програми "Експериментальні виміри", вимір крену, регулювання і калібрування показань датчика кутів крену

Рис. 3. Головне меню програми "Експериментальні виміри", вимір осадки, регулювання і калібрування показань осадкоміра

Рис. 4. Запис вимірів кутів крену

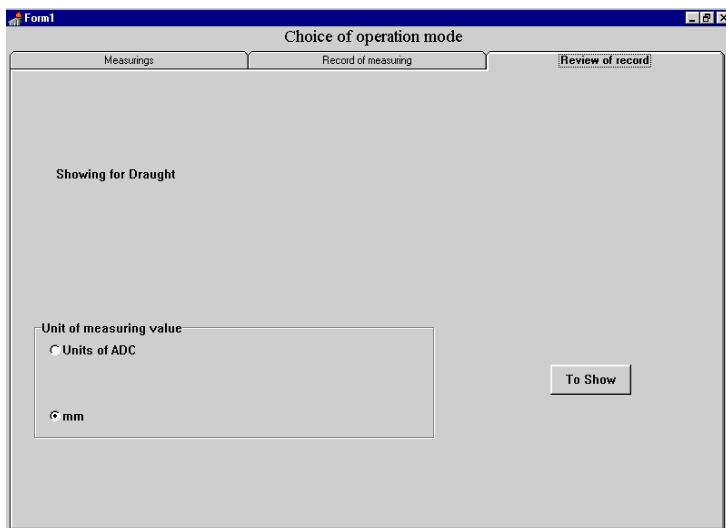


Рис. 5. Старт огляду запису осадки

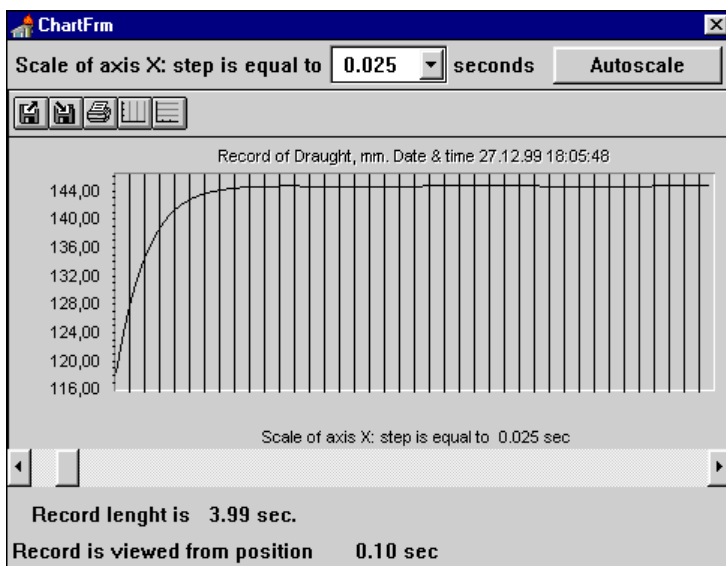


Рис. 6. Огляд запису осадки

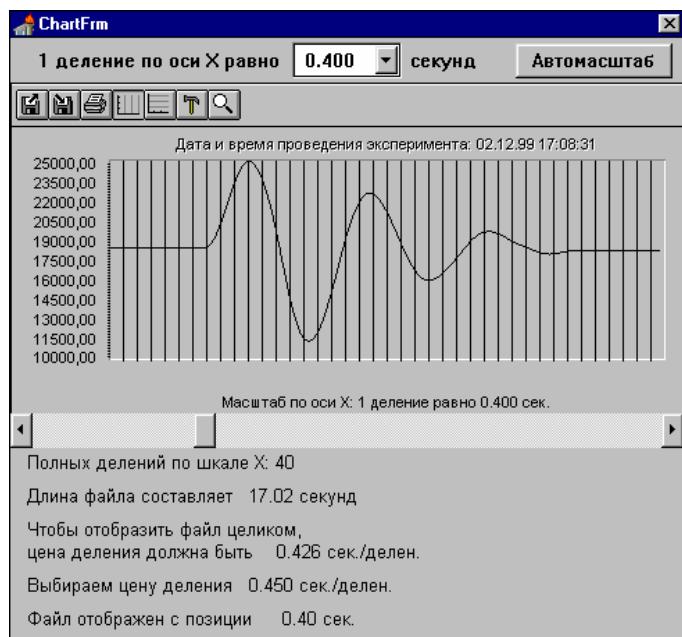
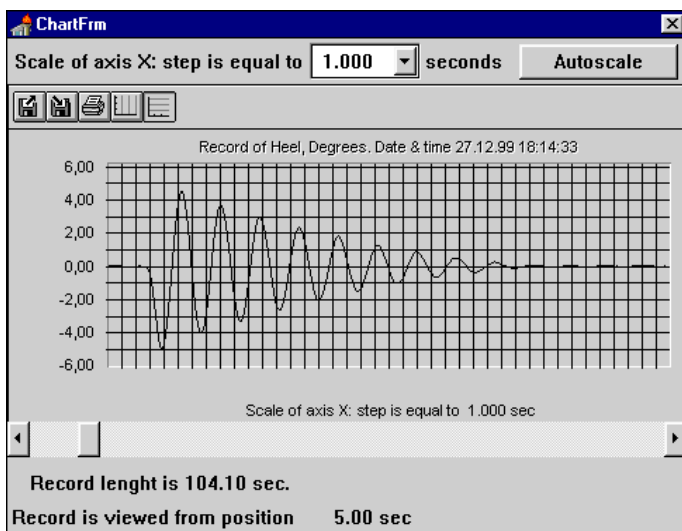
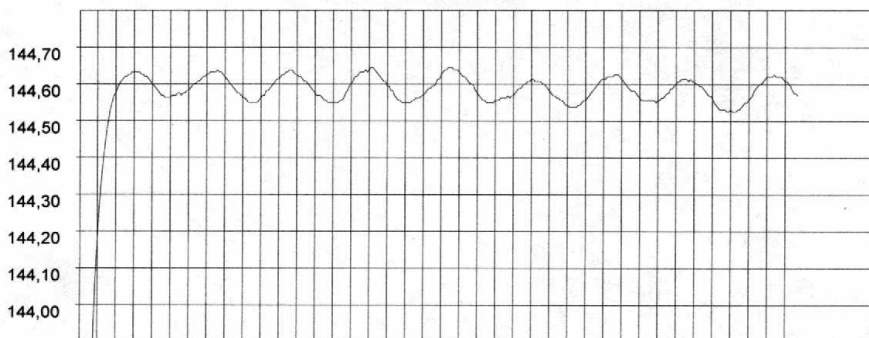


Рис. 7. Огляд бортовых коливаний

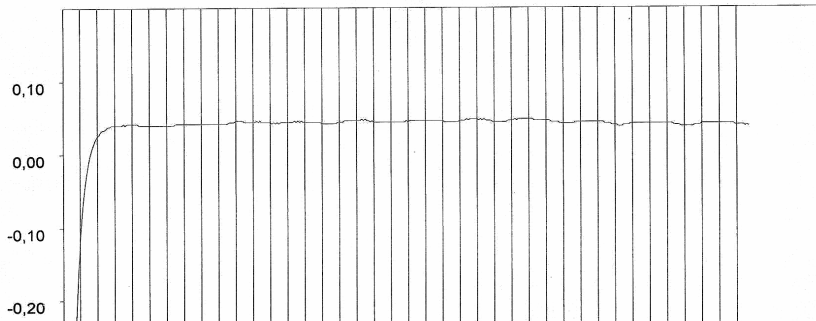
3.2. Приклади записів показань датчиків осадки, кутів крену і диференту

Record of Draught, mm. Date & time 28.12.99 14:14:25

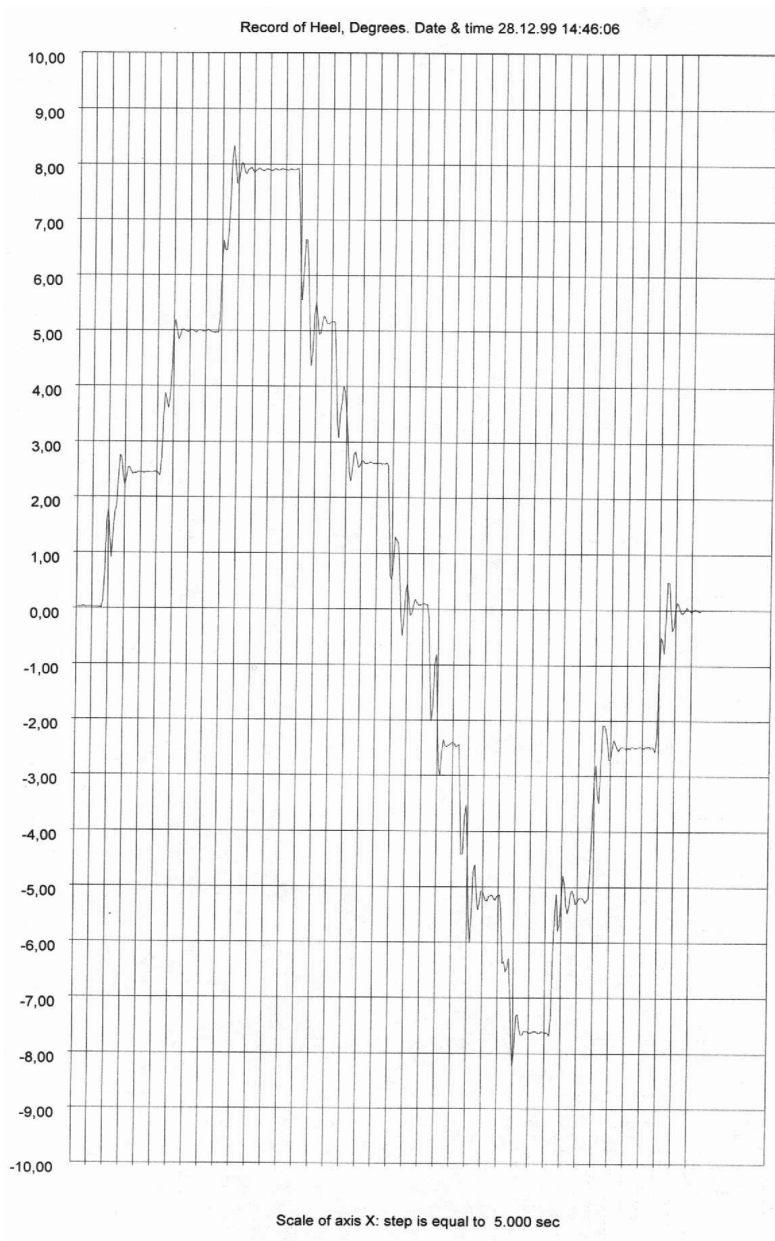


Запис показань осадкоміра після його включення

Record of Trim, Degrees. Date & time 28.12.99 13:48:21



Запис показань датчика кутів диференту після включення



Запис показань датчика кутів крену при проведенні
дослідження

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Благовещенский С.Н., Холодильн А.Н.* Справочник по статике и динамике корабля: В 2 т. – Т. 1. Статика корабля. – Л.: Судостроение, 1975. – 336 с.
 2. *Семенов-Тянь-Шанский В.В.* Статика и динамика корабля: Учебник для вузов. – Л.: Судостроение, 1973. – 608 с.
 3. *Сизов В.Г.* Теория корабля: Учеб. пособие / Одес. нац. мор. академия. – О.: ФЕНИКС, 2003. -284с.
 4. Справочник по теории корабля: В 3 т. – Т. 2. Статика корабля. Качка корабля / Под ред. *Я.И. Войткунского*. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
 5. *Semyonov-Tyan-Shansky V.* Static and Dynamic of the Ship. – Moscow: Peace Publishers. – 587 p.
-

ЗМІСТ

Розділ 1. Опис експериментальної установки	3
Розділ 2. Плавучість, остійність і непотоплюваність судна	10
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення параметрів посадки судна</i>	10
<i>Лабораторна робота № 2. Визначення характеристик зануреного об'єму корпусу судна при посадці прямо і на рівний кіль</i>	15
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження умов рівноваги судна на тихій воді</i>	25
<i>Лабораторна робота № 4. Зміна осадки і координат центра величини під час прийому (зняття) вантажу</i>	30
<i>Лабораторна робота № 5. Експериментальна перевірка початкової остійності судна</i>	33
<i>Лабораторна робота № 6. Дослідження впливу підвішених вантажів на початкову остійність судна</i>	43
<i>Лабораторна робота № 7. Дослідження впливу пливучості рідких вантажів на остійність судна</i>	48
<i>Лабораторна робота № 8. Дослідження впливу переносу вантажу на посадку і початкову остійність судна</i>	53
<i>Лабораторна робота № 9. Дослідження впливу прийому (зняття) вантажу на посадку і початкову остійність судна</i>	59
<i>Лабораторна робота № 10. Експериментальне визначення діаграми статичної остійності судна</i>	66
<i>Лабораторна робота № 11. Визначення параметрів плавучості та остійності аварійного судна</i>	70
Розділ 3. Інструкція для роботи з персональним комп'ютером	78
Список літератури	85

Навчальне видання

НЕКРАСОВ Валерій Олександрович

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВУЧОСТІ, ОСТІЙНОСТІ
ТА НЕПОТОПЛЮВАНOSTІ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ**

(українською мовою)

Редактор *М.П. Фоміна*

Комп'ютерна правка та верстка *В.Г. Мазанко*

Коректор *М.О. Паненко*

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 01.08.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 5,0. Обл.-вид. арк. 5,4.
Тираж 500 прим. Вид. № 9. Зам. № 22. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

This image shows a full page of blank, lined paper. It features approximately 28 horizontal blue or grey lines spaced evenly apart, typical of notebook paper. The lines extend across the entire width of the page, leaving small margins at the top and bottom. There are no vertical lines, text, or other markings on the page.