

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. О. Некрасов, Л. В. Забурдаєв

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДОСЛІДЖЕННЯ
ХОДОВОСТІ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2007

УДК 629.5.018

Нєкрасов В.О., Забурдаєв Л.В. Збірник лабораторних робіт з дослідження ходовості судна на тихій воді. – Миколаїв: НУК, 2007. – 60 с.

Кафедра теорії й проектування суден

Подано опис і методики виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія корабля (ходовість і керованість)".

Призначено для студентів спеціальності 8.100201 "Кораблі та океанотехніка" денної та заочної форм навчання.

Рецензент Ю.М. Король, канд. техн. наук, доц., зав. каф. гідромеханіки

ВСТУП

Ходовістю судна називається його здатність розвивати хід, використовуючи енергію внутрішнього або зовнішнього джерел [3].

Найбільш загальною характеристикою ходовості судна, в якому як рушій використовується гребний гвинт, є пропульсивний коефіцієнт η_D , що являє собою відношення буксирувальної потужності $P_E = RV$, яка затрачується на подолання сили R буксирувального опору судна при його буксируванні без рушія із заданою швидкістю V , до потужності P_D , яка підводиться до гвинта внутрішнім джерелом енергії – двигуном судна.

По суті, пропульсивний коефіцієнт є коефіцієнтом ефективності рушійного комплексу "корпус судна–рушій–руль". Чим більше значення цього коефіцієнта для судна заданої водотоннажності, що рухається із заданою швидкістю, тим краще ходовість судна. Тому основним завданням проектування рушійного комплексу судна є максимізація пропульсивного коефіцієнта [5]:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \Rightarrow \max.$$

Величини, що входять у вираз пропульсивного коефіцієнта, визначаються за допомогою експериментальних досліджень ходовості судна.

Процес експериментального дослідження ходовості судна умовно поділяється на дві частини. У першій з них розглядається ізольований рух окремих складових пропульсивного комплексу – корпусу судна, руля й гребного гвинта. У другій частині ці скла-

дові поєднуються в єдине ціле й характеристики ходовості судна визначаються з урахуванням взаємодії складових комплексу – впливу корпусу судна на роботу гребного гвинта, впливу руля на рушійну силу, створювану гребним гвинтом, і т. д. [4; 7].

Розглянута нижче сукупність лабораторних робіт призначається для здійснення першої частини згаданого експериментального дослідження ходовості судна – на основі реалізації руху ізольованих моделей корпусу судна, руля й гвинта та вивчення способу перерахування на натуру даних, отриманих у результаті експериментальних досліджень у басейні.

Розділ 1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

1.1. Малий дослідний басейн. Навчальною експериментальною установкою, що призначена для вивчення ходовості судна, є малий дослідний басейн. До складу такого басейну входить резервуар з водою; система, що буксирує моделі судна, суднового руля й суднового гвинта; система, що вимірює й реєструє характеристики руху моделей; система, що вимірює й фіксує сили, діючі на моделі, а також система, що реєструє явища, супроводжуючі рух моделей [4; 7].

1.1.1. Резервуар. Резервуаром дослідного басейну є прямокутна чаша, що має довжину 32,5 м, ширину 2,5 м та висоту 1,5 м (рис. 1.1).

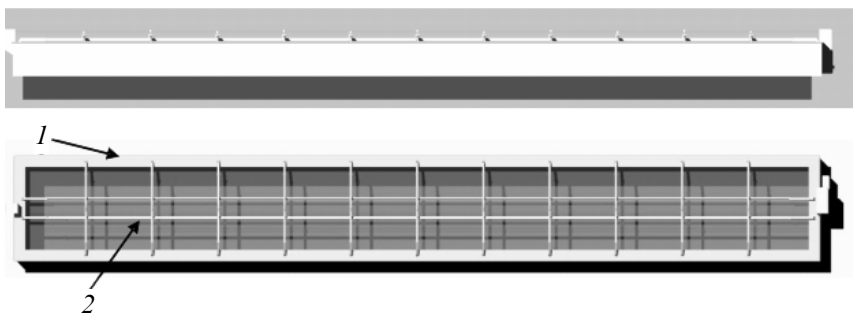


Рис. 1.1. Малий дослідний басейн (вигляд збоку й зверху):

1 – резервуар; 2 – рейковий шлях буксирувальної системи

1.1.2. Рейковий шлях. Над поверхнею рідини, налитой в резервуар, розташовується рейковий шлях, по якому рухається буксирувальний візок. Рейковий шлях опирається на поперечні балки (див. рис. 1.1).

1.2. Буксирувальна система. Система, що буксирує моделі судна, суднового руля й гвинта, реалізує наступні процеси руху:

для моделі судна при її русі по поверхні рідини басейну: масою не більше 30 кг – зі швидкостями руху до 1,5 м/с; не більше 5 кг – до 3,0 м/с; не більше 1 кг – до 6,0 м/с;

для моделі суднового руля розмірами 0,1×0,15 м при її русі під поверхнею рідини басейну зі швидкостями руху до 2 м/с;

для моделі суднового гвинта діаметром 0,10 м при її русі під поверхнею рідини дослідного басейну зі швидкостями руху до 1 м/с.

1.2.1. Буксирувальний візок. Основним елементом буксирувальної системи дослідного басейну є несамохідний буксирувальний візок (рис. 1.2), що приводиться в рух електричним приводом. Рух буксирувального візка здійснюється за допомогою тросової передачі, що перетворює обертовий рух електричного приводу в поступальний рух буксирувального візка. Буксирувальний візок рухається по рейковому шляху, розташованому в дослідному басейні над вільною поверхнею рідини. На візку встановлюється динамометр, що вимірює сили, діючі на модель судна, руля й гвинта при їхньому русі. Моделі судна, суднового руля й гвинта прикріплюються до динамометра по черзі за допомогою власних державок.

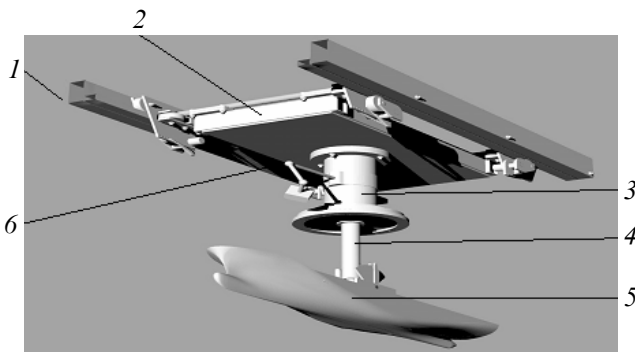


Рис. 1.2. Буксирувальний візок з моделлю вантажного судна:

1 – рейковий шлях; 2 – буксирувальний візок; 3 – динамометр; 4 – державка моделі судна; 5 – модель вантажного судна; 6 – фотоапарат

1.2.2. Привід буксирувального візка. До складу приводу буксирувального візка входять (рис. 1.3):

асинхронний електродвигун потужністю 7 кВт, із номінальним числом оборотів 1910 об/хв, що живиться від трьохфазної мережі змінного струму 380 В;

редуктор з номінальним вихідним числом оборотів 550 об/хв; перетворювач частоти потужністю 4 кВт, що живиться від трьохфазної мережі змінного струму напругою 380 В;

тросова передача, що перетворює обертання вала редуктора в поступальне переміщення буксирувального візка;

пульти керування рухом візка, що розміщаються на лицьовій панелі корпусу перетворювача частоти та на екрані персонального комп'ютера.

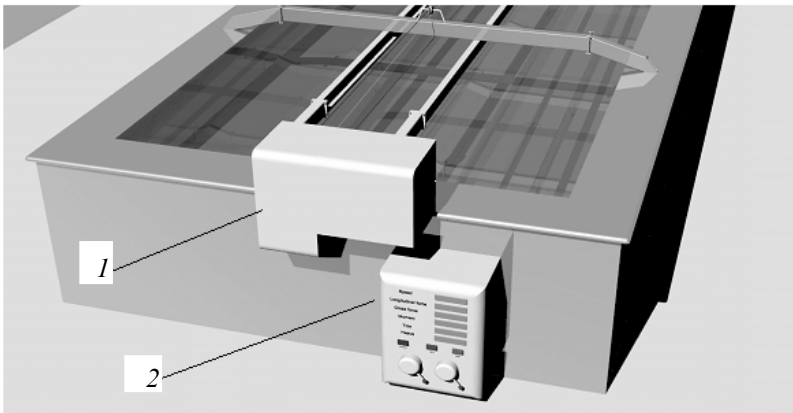


Рис. 1.3. Електропривід буксирувального візка:

- 1 – асинхронний електродвигун з редуктором у захисному корпусі;
2 – перетворювач частоти з пультом керування електроприводом

1.2.3. Керування рухом візка. Пульт керування передбачає ручне й автоматичне керування рухом буксирувального візка.

Ручне керування рухом візка здійснюється за допомогою потенціометра, що задає частоту обертання електродвигуна, – регулятора швидкості руху візка, – і кнопок "уперед", "стоп", "назад", розташованих на лицьовій панелі пульта керування електроприводом – пульта перетворювача.

Ручне та автоматичне керування рухом буксирувального візка також реалізується за допомогою базового персонального комп'ютера, що підключається до перетворювача частоти за допомогою

комплекту інтерфейсу зв'язку перетворювача частоти з персональним комп'ютером, в якому розміщається програма керування перетворювачем частоти.

У кожному з буксирувань моделі судна режим руху буксирувального візка вздовж дослідного басейну підтримується як типовий. Початкова ділянка типового руху візка вздовж басейну називається "розгінною", середня – "ділянкою усталеного руху", заключна – "гальмовою".

Залежність опору води руху моделі судна від її швидкості встановлюється в результаті проведення серії буксирувань. Для визначення цієї залежності швидкість руху буксирувального візка "вперед" на "ділянці усталеного руху" $V_{m \max}$ у процесі повторення буксирувань моделі східчасто змінюється в діапазоні швидкостей від $V_{m \max} = 0$ до $V_{m \max} = (V_{m \max})_{\max}$. При цьому максимальна швидкість $(V_{m \max})_{\max}$ заданої кількості N_y східчастої зміни швидкості $V_{m \max}$ пов'язаної із заданою кількістю N_l (10...20) буксирувань моделі судна, визначається масштабом моделі судна, але завжди залишається менше від максимальної швидкості $V_{tc \max}$, обумовленої обмеженнями за масою моделі (див. розд. 1.2).

Аналогічні серії буксирувань "уперед" реалізуються при дослідженні роботи моделей суднового руля й гребного гвинта. У цих випадках швидкість руху візка також завжди залишається менше від максимальної швидкості $V_{tc \max}$, обумовленої обмеженнями (див. розд. 1.2).

Зворотні переміщення буксирувального візка "назад" у вихідне положення на початку дослідного басейну виконуються в такій же послідовності, як і переміщення "вперед", однак завжди здійснюються з постійною на "ділянці усталеного руху" швидкістю $V_{m \max} = V_{tc \min}$.

Перед кожним буксируванням моделі "вперед" або "назад" у процесі руху буксирувального візка робляться тимчасові перерви тривалістю 1...3 хв для природного заспокоєння обуреного руху рідини.

1.3. Система, що вимірює й реєструє характеристики руху моделей. У процесі модельного експерименту значення характеристик руху моделей визначаються за допомогою датчиків переміщень і швидкостей. Сигнали цих датчиків обробляються контролером, розташованим на буксирувальному візку, перетворювачем частоти електричного приводу буксирувальної системи

й базовим персональним комп'ютером. Значення сигналів датчиків після обробки й збереження в пам'яті контролерів і базового персонального комп'ютера представляються на екрані монітора персонального комп'ютера. При необхідності записані сигнали датчиків або їх узагальнені (усереднені) значення виводяться на друк за допомогою принтера.

Рух моделі судна по вільній поверхні рідини, особливо моделі швидкохідного судна, супроводжується появою т. зв. ходового спливання і ходового диференту. Ці характеристики ходовості моделі судна визначаються за допомогою датчика вертикального переміщення моделі й датчика кутового переміщення, які розташовуються у державці моделі судна.

У зв'язку із цим, основними реєстрованими характеристиками руху моделі судна є:

швидкість поступального руху моделі V_m , яка визначається за допомогою цифрового датчика числа обертів ведучого колеса тросової передачі руху; в розглянутій буксирувальній системі ця величина вимірюється в межах від $V_{tc\ min} = 0$ до $V_{tc\ max} = 6$ м/с;

вертикальне переміщення моделі судна δT_m щодо незбуреного рівня вільної поверхні рідини в дослідному басейні, яке визначається за допомогою індуктивного датчика лінійних переміщень; у розглянутій буксирувальній системі ця величина вимірюється в межах від $\delta T_{m\ min} = -50$ мм до $\delta T_{m\ max} = +50$ мм;

кут ходового диференту моделі судна θ_m , який визначається за допомогою потенціометричного датчика кутових переміщень; у розглянутій буксирувальній системі ця величина вимірюється в межах від $\theta_{m\ min} = -50$ град до $\theta_{m\ max} = +50$ град.

На корпусі датчика вертикальних переміщень моделі судна розташовується компенсатор ваги його рухливої частини. Цей компенсатор виключає дію сили ваги рухливої частини датчика вертикальних переміщень моделі судна на модель судна.

Під час своєї природної експлуатації судно часто, а руль – практично безупинно, розташовуються під деякими кутами стосовно потоків рідини, що на них набігають. Для моделювання цих особливостей роботи судна й руля при проведенні експерименту за допомогою розглянутої буксирувальної системи державка моделі обладнана спеціальним поворотним пристроєм. Цей пристрій здатний створювати стосовно потоків рідини, що набігають у процесі буксирувань, кути дрейфу моделі або кути повороту руля ψ_m у межах від $\psi_{m\ min} = -35$ град до $\psi_{m\ max} = +35$ град із кроком 5 град.

Датчики переміщень моделі, розташовані в державці моделі судна, живляться від акумуляторів, розміщених на буксирувальному візку, і передають свої сигнали контролеру, також розташованому в окремому корпусі на візку. Цей контролер під час руху моделі "вперед" накопичує й зберігає сигнали датчиків переміщень моделі судна у своїй пам'яті.

Після того як буксирування "вперед" завершиться, і буксирувальний візок вернеться "назад", у своє вихідне положення на початку дослідного басейну, контролер, розташований на буксирувальному візку, за допомогою спеціального рознімного контактора з'єднується з базовим персональним комп'ютером.

Під час змушеного відстою буксирувального візка перед наступним буксируванням моделі інформація про сигнали датчиків переміщень моделі, накопичена в контролері, встановленому на буксирувальному візку, автоматично переноситься в базовий персональний комп'ютер.

Датчик швидкості поступального руху моделі V_m , який використовується як датчик числа обертів ведучого колеса тросової передачі й має свій контролер, розташовується в нерухливій частині буксирувальної системи. Тому з персональним комп'ютером він з'єднаний постійно. Живлення датчика швидкості поступального руху моделі, перетворювача його сигналів і берегового контролера інкрементального датчика реалізується від внутрішньої мережі перетворювача частоти.

1.4. Система, що вимірює й реєструє характеристики сил, діючих на моделі. При наявності у моделі судна не рівного нулю кута дрейфу її рух по вільній поверхні рідини супроводжується появою не тільки поздовжньої сили опору X_m , але й поперечної сили дрейфу Y_m , а також моменту сили дрейфу M_m . Значення цих величин визначаються за допомогою трикомпонентного тензометричного динамометра, що з'єднує державку моделі з буксирувальним візком. У зв'язку із цим, основними реєстрованими характеристиками діючих на модель судна сил і моментів є:

орієнтована за напрямком руху буксирувального візка поздовжня сила опору води руху моделі судна X_m ; у розглянутому динамометрі ця величина визначається за допомогою тензометричних датчиків сили і вимірюється в межах $X_m = [-10 \text{ Н}, +10 \text{ Н}]$;

орієнтована перпендикулярно напрямку руху буксирувального візка поперечна сила – сила дрейфу моделі судна Y_m ; у розгля-

нутому динамометрі ця величина визначається за допомогою тензометричних датчиків сили і вимірюється в межах $Y_m = [-10 \text{ Н}, +10 \text{ Н}]$;

момент сили дрейфу моделі судна M_m ; у розглянутому динамометрі ця величина визначається за допомогою тензометричних датчиків сили і вимірюється в межах $M_m = [-40 \text{ Н}\cdot\text{м}, +40 \text{ Н}\cdot\text{м}]$.

При буксируваннях моделі судна з кутами дрейфу й моделі суднового руля основною метою буксирувань є визначення значень X_m , Y_m , і M_m за допомогою датчиків трикомпонентного динамометра.

При буксируваннях моделі суднового гвинта основною метою є визначення його упору T_m (Н) і моменту Q_m (Н·м). Визначення цих характеристик зазвичай здійснюється при прямому набіганні потоку на працюючий при постійному числі обертів гребний гвинт.

Роботу гвинта (при постійному числі обертів гвинта, рівному 250 об/хв, у всіх режимах його буксирувань зі швидкостями до 1,0 м/с) забезпечує розміщений у державці гвинта електромотор постійного струму, що живиться від двох акумуляторів, установлених на візку. Тому під час експерименту з моделлю гвинта трикомпонентним динамометром фіксується тільки упор гвинта $T_m = X_m$. Для визначення моменту гвинта використовується спеціальний електричний пристрій, який розміщується в корпусі контролера буксирувального візка. Цей пристрій визначає значення моменту гвинта Q_m за величиною струму, споживаного його електромотором.

Датчики діючих на модель судна сил також живляться від акумуляторів, розташованих на буксирувальному візку, і передають свої сигнали контролеру датчиків переміщень і сил, розташованому в окремому корпусі на тому же візку. Цей контролер під час руху моделі "вперед" накопичує й зберігає у своїй пам'яті сигнали датчиків переміщень моделі судна й діючих на неї сил.

Після того як буксирування "вперед" завершиться, і буксирувальний візок вернеться "назад", у своє вихідне положення на початку дослідного басейну, контролер датчиків переміщень і сил за допомогою рознімного контактора з'єднується з базовим персональним комп'ютером.

Під час змушеного відстою буксирувального візка перед наступним буксируванням моделі інформація про сигнали датчиків

переміщень моделі й діючих на неї сил, накопичена в контролері, встановленому на буксирувальному візку, переноситься в базовий персональний комп'ютер.

1.5. Проміжні й підсумкові результати експерименту, що представляються на екрані базового персонального комп'ютера. У результаті проведення одиничних буксирувань моделей контролерами, які розташовані в перетворювачі частоти і на буксирувальному візку, визначаються наступні характеристики ходовості:

в експерименті з моделлю судна: швидкість поступального руху моделі судна V_m , м/с; вертикальне переміщення моделі судна щодо незбуреного рівня вільної поверхні рідини δT_m , мм; кут ходового диференту моделі судна θ_m , град; поздовжня сила опору води руху моделі судна X_m , Н; поперечна сила – сила дрейфу моделі судна Y_m , Н; момент сили дрейфу моделі судна M_m , Н·м;

в експерименті з моделлю суднового руля: швидкість поступального руху моделі руля V_m , м/с; поздовжня сила – лобовий опір моделі руля $X_m = X_r$, Н; поперечна сила – підйомна сила руля $Y_m = Y_r$, Н; момент руля $M_m = M_r$, Н·м;

в експерименті з моделлю суднового гвинта: швидкість поступального руху моделі гвинта V_m , м/с; упор гвинта $X_m = X_r$, Н; момент гвинта (окремий цифровий показчик) M_m , Н·м.

Значення цих величин надходять у пам'ять базового комп'ютера. Цей комп'ютер накопичує поступаючу інформацію й обробляє її з метою видачі підсумкових результатів експерименту у вигляді:

таблиць і графіків залежності кожної з вимірюваних величин від часу за період руху моделі "вперед" у кожному з N_i буксирувань;

таблиць і графіків залежності кожної з вимірюваних величин від середньої на "ділянці усталеного руху" швидкості руху моделі.

Керування експериментом, порядок проходження й накопичення інформації, реєстрація та обробка даних реалізуються за допомогою програмного забезпечення.

Накопичена за весь час експерименту інформація у вигляді протоколу буксирувальних випробувань виводиться на друк за допомогою принтера. Підготовка й порядок проведення експерименту реалізуються відповідно до описів лабораторних робіт (ЛР) з ходовості судна, що наводяться нижче.

1.6. Система, що реєструє явища, супроводжуючі рух моделей. Явища, супроводжуючі рух моделей, вивчаються візуально

та фіксуються за допомогою фото- і кіноапаратури, яка встановлюється на буксирувальному візку й в інших місцях дослідного басейну.

Цифровий фотоапарат, який установлений на буксирувальному візку, на початку буксирування "вперед" включається за допомогою спеціального вимикача таким чином, щоб за весь час руху "вперед" у кожному буксируванні зробити свою серію знімків. Кожний знімок має тимчасове маркування, що дозволяє синхронізувати результати фотозйомки з показаннями датчиків характеристик руху моделі й датчиків діючих на неї сил і моментів.

Розділ 2. ОПІР ВОДИ РУХУ СУДНА

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ СУДНА Й ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

Мета роботи: визначення характеристик моделі судна, використовуваних при експериментальному дослідженні опору води руху судна по вільній поверхні рідини; ознайомлення з малим дослідним басейном, послідовністю проведення експерименту й можливостями вимірювальної апаратури малого дослідного басейну.

1.1. Загальні відомості про модель судна. Модель судна, призначену для буксирування в дослідному басейні, виготовляють за теоретичним кресленням з парафіну з додаванням невеликої (5...10 %) кількості воску. Необхідна твердість парафінової моделі забезпечується внутрішнім каркасом (скельтоном) з фанери або склопластику. Спочатку парафінова модель обробляється на копіювально-фрезерному верстаті за теоретичними ватерлініями (ВЛ). Подальша доробка поверхні моделі здійснюється вручну: спочатку стругами й рубанками, а потім за допомогою циклі.

Гладка, відповідна теоретичному кресленню, зовнішня поверхня моделі, яка виконана з міцного корпусу (скельтону) із зовнішнім шаром парафіну товщиною порядку 15 мм, що залишився на ньому, перевіряється за 10–20 шпангоутними контршаблонами і контршаблонами країв.

Перед фарбуванням поверхня корпусу моделі полірується. Фарбування поверхні здійснюється у два шари емалі (типу НЦ-25), що забезпечує гідродинамічну гладкість зовнішньої поверхні моделі.

Для реєстрації величини й форми змоченої поверхні на корпусі моделі виконується розмітка – сітка з теоретичних шпангоутів і ВЛ.

Посадка моделі, що відповідає заданому випадку навантаження, забезпечується вантажами, розташовуваними в моделі.

У корпусі моделі створюються площадки з кріпленнями, за допомогою яких забезпечується прикріплення моделі до державки буксирувального візка на рівні лінії дії упору гребного гвинта.

Для визначення зміни посадки моделі при ході на тихій воді та фіксації її ходових кутів диференту в носовому й кормовому краях моделі встановлюються вертикальні лінійки, за допомогою яких визначається положення країв моделі щодо горизонтальної планки, жорстко закріпленої на візку. Ходове спливання моделі та її ходовий диферент також вимірюються за допомогою електронних датчиків вертикального переміщення моделі та її кутів диференту, розташованих на державці моделі.

Для приведення у відповідність частини змоченої поверхні корпусу моделі, що знаходиться під дією турбулентного прикордонного шару, аналогічній за величиною частині поверхні натурального судна, у носовому краї моделі встановлюється дровий турбулізатор.

1.2. Попередні розрахунки для проведення лабораторних робіт

1.2.1. Розрахунок діаметра дрового турбулізатора моделі судна. При буксирувальних випробуваннях моделей судна невеликого масштабу співвідношення довжин ламінарної й турбулентної ділянок її прикордонного шару істотно відрізняється від співвідношення таких же ділянок прикордонного шару натурної. Для підтримки цієї відповідності на моделі судна встановлюється дровий турбулізатор. Він розташовується в районі першого теоретичного шпангоута за контуром шпангоутного перетину. У залежності від форми корпусу моделі судна й обраного положення турбулізатора рекомендується такий діаметр дроту турбулізатора, що визначається за формулою

$$d_t = 0,11k \frac{L_m \sqrt{X_t}}{\sqrt{\text{Re}_m}}, \quad (1.1)$$

де L_m – довжина моделі по ВЛ, м; X_t – відстань турбулізатора від носового перпендикуляра; k – коефіцієнт ($k = 18...22$), залежний від кута входу конструктивної ВЛ; Re_m – число Рейнольдса моделі; v_m – кінематичний коефіцієнт в'язкості води, в якій випробується модель, m^2/s (приймається залежно від температури та щільності води за табл. 1.1); V_m – швидкість руху моделі, m/s .

Таблиця 1.1. Залежність коефіцієнта v_m від температури

Вода	Температура $t, ^\circ C$				
	0	10	15	20	30
Прісна, $\rho_m=1000 \text{ кг/м}^3$, $v_m \times 10^6$	1,794	1,309	1,144	1,011	0,806
Солона, $\rho_m=1025 \text{ кг/м}^3$, $v_m \times 10^6$	1,780	1,318	1,158	1,025	0,825

Опір турбулізатора визначається за наближеною формулою

$$R_t = 0,3 \rho_m V_m^2 l_t d_t, \quad (1.2)$$

де ρ_m – щільність рідини; l_t – довжина змоченої частини турбулізатора; d_t – діаметр турбулізатора; V_m – швидкість руху моделі.

1.2.2. Розрахунок площ змоченої поверхні та її проєкції на діаметральну площину. Формули перерахування результатів модельних випробувань на натуру при русі моделі з не рівними нулю кутами дрейфу потребують попереднього розрахунку не тільки площ змочених поверхонь моделі та судна, але й площ проєкцій їхніх підводних частин, а також площ проєкцій виступаючих частин моделі та судна на діаметральні площини.

Для розрахунку площ змочених поверхонь корпусів моделі й судна можливе застосування найбільш простого методу, що приводить до гарних результатів. Метод полягає в тому, щоб за допомогою курвіметра або смужки паперу виміряти за теоретичним кресленням напівпериметри шпангоутів і визначити довжини напівпериметрів як ординати кривої їхнього розподілу за довжиною судна. Площа, що обмежується цією кривою і дорівнюється площі змоченої поверхні моделі, може бути визначена за наближеними формулами чисельного інтегрування – за правилом трапецій:

$$S_{hm} = \Delta L \left(\sum_{i=0}^n l_i - \frac{l_0 + l_n}{2} \right), \quad (1.3)$$

де ΔL – шпация; l_i – довжина контуру змоченої частини i -го шпангоута.

Дійсна змочена поверхня судна внаслідок своєї кривизни завжди має трохи більшу площу, ніж обчислена за наведеною формулою, тому до результату розрахунку за формулою (1.1) потрібно додати $\sim 1\%$ отриманої площі, розглядаючи це додавання як виправлення, що враховує кривизну.

До розрахованої змоченої поверхні також треба додати величину змоченої поверхні виступаючих частин S_{pp} . У випадку експерименту з моделлю яхти – це площі змочених поверхонь плавникового фальшкіля й руля, які визначаються також за допомогою теоретичного креслення.

За аналогічною формулою розраховується і площа проекції підводної частини корпусу моделі на діаметральну площину:

$$S_{hcrм} = \Delta L \left(\sum_{i=0}^n T_i - \frac{T_0 + T_n}{2} \right), \quad (1.4)$$

де T_i – осадка i -го шпангоута.

Для розрахунку площі змоченої поверхні S_m і площі проекції підводної частини моделі на діаметральну площину $S_{crм}$ можна використовувати табл. 1.2 і 1.3, а також результати обчислень цих величин різними системами автоматичного проектування суден.

Таблиця 1.2. Розрахунок площі змоченої поверхні моделі S_m

Номер шпангоута						Сума	Поправка	Виправлена сума	S_{hm} (корпусу)	S_m (повна)
0	1	...	...	$n-1$	n					
Напівпериметри шпангоутів						Σl_i	$\frac{l_0 + l_n}{2}$	Σ'	$(2\Delta/\Sigma') \times 1,01$	$S_{hm} + S_{ppm}$
l_0	l_1	...	...	l_{n-1}	l_n					

Таблиця 1.3. Розрахунок площі $S_{crм}$

Номер шпангоута						Сума	Поправка	Виправлена сума	$S_{hcrм}$ (корпусу)	$S_{crм}$ (повна)
0	1	...	...	$n-1$	n					
Напівпериметри шпангоутів						ΣT_i	$\frac{T_0 + T_n}{2}$	Σ'	$\Sigma' \Delta l$	$S_{hcrм} + S_{ppcrм}$
T_0	T_1	...	...	T_{n-1}	T_n					

Підсумкові значення площі змоченої поверхні корпусу моделі S_m і площі проекції підводної частини моделі на діаметральну площину $S_{срм}$ визначаються за формулами

$$S_m = S_{hm} + S_{PPM}; \quad S_{срм} = S_{hсрм} + S_{PPсрм}. \quad (1.5)$$

1.3. Ознайомлення з малим дослідним басейном, послідовністю проведення експерименту й можливостями вимірювальної апаратури

Первісне ознайомлення з призначенням малого дослідного басейну, його встаткуванням, послідовністю проведення експерименту й можливостями апаратури, що реєструє характеристики руху моделі судна та діючі на неї сили й моменти, здійснюється відповідно до викладеного в розд. 1, Дод. 1 і Дод. 2. Наступне ознайомлення здійснюється безпосередньо в дослідному басейні під керівництвом викладача.

Лабораторна робота № 2

БУКСИРУВАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛІ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ ПРИ РУСІ БЕЗ КУТА ДРЕЙФУ

Мета роботи: експериментальне визначення характеристик опору води руху моделі судна по вільній поверхні рідини та її посадки при русі.

2.1. Теоретичні відомості

2.1.1. Загальні відомості про опір води руху судна і його моделей. При русі зі швидкістю V судно випробовує силу опору води R , спрямовану в протилежний його руху бік. Величина цієї сили залежить від розмірів і форми обводів корпусу судна, стану його зовнішньої обшивки, а також режиму й умов руху судна.

Для визначення сили опору води руху судна виділимо на його змоченій поверхні елементарну площадку dS (рис. 2.1). З боку рідини на цю площадку діє елементарна гідродинамічна сила, створювана діючими в рідині напругами. Нормальна складова напруги

називається гідродинамічним тиском p , дотична складова – дотичним напруженням τ сили тертя.

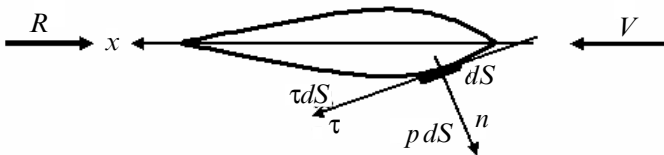


Рис. 2.1. Елементарні сили, діючі на рухливу поверхню корпусу судна

Інтегрування по змоченій поверхні корпусу судна S проєкцій на вісь ox елементарних дотичних сил τdS приводить до наступного виразу для опору тертя:

$$R_F = \int_S \tau \cos(\tau, x) dS. \quad (2.1)$$

Ця складова сили опору R є наслідком властивості в'язкості рідини.

Інтегрування по змоченій поверхні судна S проєкцій на вісь ox елементарних сил $p dS$ гідродинамічного тиску дозволяє одержати вираз для опору тиску:

$$R_P = \int_S p \cos(p, x) dS. \quad (2.2)$$

Опір тиску представляється у вигляді двох складових – опору форми R_{VP} і хвильового опору R_W :

$$R_P = R_{VP} + R_W. \quad (2.3)$$

Опір форми є наслідком впливу в'язкості рідини на розподіл гідродинамічних тисків за корпусом судна. Хвильовий опір виникає внаслідок впливу хвилювання, викликаного рухом судна по поверхні води, на розподіл гідродинамічних тисків по його змоченій поверхні.

В основу теорії опору води руху судна покладене припущення про незалежність, у першому наближенні, складових, що становлять опір. У цьому наближенні, у силу слабкості взаємного впливу, вважається, що сили в'язкості не впливають на процес

хвилестворення та, навпаки, на опір тертя й форми не впливає хвильовий рух рідини. У наступних наближеннях взаємодія між складовими опором враховується.

Таким чином, у першому наближенні повний опір води руху судна можна записати у вигляді суми трьох основних складових:

$$R = R_F + R_{VP} + R_W. \quad (2.4)$$

Сума опором тертя й опором форми називається в'язкістним опором судна R_V :

$$R_V = R_F + R_{VP}. \quad (2.5)$$

При русі судно зазнає також впливу повітряного середовища. Опір повітря руху судна R_{AA} представляється як проекція на напрямок руху результуючих аеродинамічних сил, діючих на надводну частину судна. Ця складова опором зазвичай мала за величиною й представляє невелику частку повного опором середовищ.

Крім сили опором при розрахунку ходовості судна використовується поняття буксирувальної потужності судна P_E , тобто потужності, яку необхідно затратити, щоб буксирувати судно без рушіїв зі швидкістю V .

Буксирувальна потужність, кВт, визначається за формулою

$$P_E = ENP = RV, \quad (2.6)$$

де R – повний опір руху, Н; V – швидкість судна, м/с.

2.1.2. Елементи теорії динамічної подоби потоків. Одним з найбільш ефективних шляхів вивчення опором води є експериментальне дослідження руху моделей суден у гідродинамічних лабораторіях – дослідних басейнах [3; 4; 7].

Для того щоб на основі результатів випробувань моделей можна було з достатньою вірогідністю судити про гідродинамічні сили, діючі на модельовані натурні об'єкти в процесі експериментальних досліджень, необхідно забезпечити подобу потоків, обтікаючих натурний об'єкт і його модель.

Потоки рідини, обтікаючі натурне судно і його модель, складаються з безконечного числа точок. Пари точок, що займають однакові відносні положення в потоках, називаються схожими точками, а відстань між двома схожими точками в кожному з потоків – схожими розмірами. До числа схожих розмірів відносять головні розміри судна й моделі – довжина, ширина, осадка тощо.

Існують три види подоби: геометрична, кінематична й динамічна.

1. Потоки рідини, обтікаючі натурне судно і його модель, називаються геометрично подібними, якщо всі схожі лінійні розміри $L_{\text{н}}$ і $L_{\text{м}}$ потоків перебувають у тому відношенні:

$$\frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}} = l, \quad (2.6)$$

де l – модуль або масштаб геометричної подоби.

При дотриманні геометричної подоби відношення схожих площ S натури й моделі дорівнює квадрату масштабу подоби, а схожих об'ємів ∇ – його третього ступеня:

$$\frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{м}}} = l^2; \quad \frac{\nabla_{\text{н}}}{\nabla_{\text{м}}} = l^3. \quad (2.7)$$

2. Потоки рідини, обтікаючі натурне судно і його модель, називаються кінематично подібними, якщо схожі точки потоків описують геометрично подібні відрізки траєкторій протягом схожих проміжків часу $T_{\text{н}}$ і $T_{\text{м}}$, відношення яких рівнозначно для всіх схожих відрізків траєкторій:

$$\frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{м}}} = t, \quad (2.8)$$

де t – масштаб часу.

Кінематично подібні потоки є і геометрично подібними.

У кінематично подібних потоках відношення швидкостей схожих точок $V_{\text{н}}$ і $V_{\text{м}}$ у схожі моменти часу постійне. Воно дорівнює відношенню масштабів лінійних розмірів і часу:

$$\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{м}}} = \frac{l}{t}. \quad (2.9)$$

3. Кінематично подібні потоки називаються динамічно подібними, якщо відношення мас залишається рівнозначним для всіх геометрично подібних схожих об'ємів:

$$\frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{м}}} = m. \quad (2.10)$$

Припускаючи в цій формулі $M_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} V_{\text{н}}$ і $M_{\text{м}} = \rho_{\text{м}} V_{\text{м}}$, де $\rho_{\text{н}}$ і $\rho_{\text{м}}$ – щільності рідин, що омивають натурне судно і його модель, одержимо

$$m = r l^3, \quad (2.11)$$

де $r = \rho_{\text{н}} / \rho_{\text{м}}$.

Отримане дозволяє визначити співвідношення сил $R_{\text{н}}$ і $R_{\text{м}}$, діючих на схожі маси $M_{\text{н}}$ і $M_{\text{м}}$ у динамічно подібних потоках.

Оскільки, наприклад, відповідно до закону Ньютона

$$R_{\text{н}} = M_{\text{н}} \left(\frac{dV_{\text{н}}}{dT_{\text{н}}} \right); \quad R_{\text{м}} = M_{\text{м}} \left(\frac{dV_{\text{м}}}{dT_{\text{м}}} \right), \text{ то}$$

$$\frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{м}}} = r \frac{l^4}{t^2}. \quad (2.12)$$

Це співвідношення має місце для всіх категорій сил, діючих у потоках рідини, незалежно від їхньої фізичної природи, у тому числі й для сили опору води руху судна, сили опору дрейфу судна і т. д.

З огляду на те, що $r = \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{м}}}$; $l^2 = \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{м}}}$ і $\frac{l^2}{t^2} = \frac{V_{\text{н}}^2}{V_{\text{м}}^2}$, вираз (2.12) звичай записується у вигляді

$$\frac{R_{\text{н}}}{\frac{\rho_{\text{н}} V_{\text{н}}^2}{2} S_{\text{н}}} = \frac{R_{\text{м}}}{\frac{\rho_{\text{м}} V_{\text{м}}^2}{2} S_{\text{м}}} = C. \quad (2.13)$$

Це дозволяє записати загальну формулу для повного опору води

$$R = C \frac{\rho V^2}{2} S, \text{ кН}, \quad (2.14)$$

де C – коефіцієнт повного опору; ρ – щільність води (у практичних розрахунках для прісної води варто прийняти $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3 = 1,0 \text{ кН} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; для морської води – $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3 = 1,025 \text{ кН} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$); S – площа змоченої поверхні, м^2 .

Визначимо вимоги, при виконанні яких рівність (2.12) виконується. Оскільки основними властивостями рідини є її інерційність і в'язкість, то по черзі розглянемо потоки, в яких одна з властивостей домінує.

1. Припустимо спочатку, що в потоках істотну роль відіграють явища, викликані вагомистю рідини (наприклад, хвильовий опір).

Приймаючи $R_H = M_H g_H$ і $R_M = M_M g_M$, де g – прискорення сили ваги, одержимо

$$\frac{R_H}{R_M} = r l^3 \frac{g_H}{g_M}. \quad (2.15)$$

Прирівнюючи тепер праві частини виразів (2.12) і (2.15), маємо

$$r \frac{l^4}{t^2} = r l^3 \frac{g_H}{g_M}.$$

Ця рівність може бути переписана у вигляді

$$\frac{V_H}{\sqrt{g_H L_H}} = \frac{V_M}{\sqrt{g_M L_M}} \quad \text{або} \quad Fr_H = Fr_M. \quad (2.16)$$

Оскільки отримана рівність характеризує відношення інерційних сил, у т. ч. і сил ваги, діючих у динамічно подібних потоках рідини, то вона є одним із критеріїв динамічної подоби потоків.

Вхідне у рівність відношення $V/\sqrt{gL} = Fr$ називають числом Фруда. Тому рівність (2.16) називається критерієм подоби за числом Фруда.

2. Розглянемо тепер потоки, в яких істотну роль відіграють сили, обумовлені проявом властивості в'язкості рідини. Урахуємо при цьому, що дотичні напруження, діючі у потоці рідини, визначаються за формулою

$$\tau = \nu \rho \frac{dV}{dn},$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини; dV/dn – градієнт швидкості в напрямку, перпендикулярному потоку.

Тоді відношення сил в'язкісної природи, діючих у потоках, які обтікають судно і його модель, визначається за формулою

$$\frac{R_H}{R_M} = \frac{rl^2}{t} \frac{v_H}{v_M}. \quad (2.17)$$

Прирівнюючи праві частини виразів (2.12) і (2.17), одержимо

$$r \frac{l^4}{t^2} = \frac{rl^2}{t} \frac{v_H}{v_M}. \quad (2.18)$$

Ця рівність може бути переписана у вигляді

$$\frac{V_H L_H}{v_H} = \frac{V_M L_M}{v_M} \quad \text{або} \quad Re_H = Re_M. \quad (2.19)$$

Отримана рівність характеризує відношення сил в'язкісної природи, діючих у динамічно подібних потоках рідини. Вона також є одним із критеріїв динамічної подоби потоків.

Оскільки вхідне в цю рівність відношення $VL / v = Re$ називається числом Рейнольдса, то (2.19) називається критерієм динамічної подоби потоків за числом Рейнольдса.

3. Додатковими до розглянутих критеріями динамічної подоби є:

рівність відповідних натурі й моделі чисел Ейлера $Eu = 2p/\rho V^2$:

$$Eu_H = Eu_M \quad (2.20)$$

і рівність відповідних чисел Струхаля $Sh = \frac{VT}{L}$:

$$Sh_H = Sh_M, \quad (2.21)$$

де p – характерний тиск у потоці; T – характерний проміжок часу.

Для тіл, рух яких у рідині не супроводжується явищами кавітації, критерій динамічної подоби потоків за числом Ейлера забезпечується автоматично в схожих точках потоків, обтікаючих судно та його модель, за умови виконання критеріїв подоби за числами Fr і Re .

Рівність чисел Струхаля є критерієм подоби для неусталених рухів. При дослідженні усталених рухів цей критерій не розглядається.

В умовах усталеного руху, при безкавітаційному обтіканні корпусу судна, коефіцієнт C повного опору води руху судна є функцією тільки чисел Фруда й Рейнольдса:

$$C = f(\text{Fr}, \text{Re}). \quad (2.22)$$

Після введення складових цього коефіцієнта формулу для повного опору води руху судна (2.14) можна представити у вигляді

$$R = (C_F + C_{VP} + C_W) \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (2.23)$$

де C_F – коефіцієнт опору тертя; C_{VP} – коефіцієнт опору форми; C_W – коефіцієнт хвильового опору.

При використанні припущення незалежності складових опору можна вважати, що коефіцієнти опору тертя й форми є функціями тільки числа Рейнольдса, а коефіцієнт хвильового опору – тільки числа Фруда.

Дослідження ходовості судна при усталених режимах його руху приводить до розгляду критеріїв подоби за числами Фруда й Рейнольдса. Ці критерії, за умови рівності прискорення g для натури й моделі, а також за умови рівності щільностей води ρ та її кінематичних коефіцієнтів в'язкості ν у натурних умовах руху судна й у його модельному експерименті, приводять до наступних виразів для швидкості руху моделі:

$$\text{Fr}_n = \text{Fr}_m \rightarrow V_m = V_n / \sqrt{l}; \quad (2.24)$$

$$\text{Re}_n = \text{Re}_m \rightarrow V_m = V_n / l. \quad (2.25)$$

Звідси одержуємо, що у звичайних умовах проведення експерименту ($g_n = g_m$, $\rho_n = \rho_m$, $\nu_n = \nu_m$) при зазвичай прийнятних масштабах моделей ($l \sim 100$) друге необхідне співвідношення швидкостей моделі й натури не можна реалізувати.

Тому при експериментальному дослідженні опору води руху судна в дослідному басейні моделювання з використанням критерію подоби за числом Рейнольдса не виконується. Виконується тільки моделювання з використанням критерію подоби за числом Фруда. Передбачається, що опір тертя як моделі, так і натури, можна визначити розрахунковим шляхом.

При використанні цього припущення інші складові опору (опір

форми й хвильовий опір) представляються у вигляді суми, яка називається залишковим опором:

$$R_R = R_{VP} + R_{W.} \quad (2.26)$$

Тоді повний опір води руху судна представляється у вигляді

$$R = R_F + R_R = (C_F + C_R) \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (2.27)$$

де C_R – коефіцієнт залишкового опору.

Уважається, що залишковий опір залежить тільки від числа Фруда.

При задоволенні критерію за числом Фруда виконується рівність коефіцієнтів залишкового опору натури й моделі:

$$C_{Rn} = C_{Rm} = C_R. \quad (2.28)$$

2.1.3. Характеристики посадки судна і його моделей. Для визначення посадки судна – його положення щодо вільної поверхні рідини – використовується жорстко пов'язана із судном ліва система координат (рис. 2.2). Початок цієї системи координат – точка o – розташовується на лінії

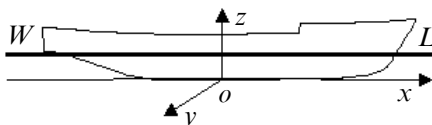


Рис. 2.2. Система координат, пов'язана із судном

кіля в точці перетину горизонтальної площини (основної 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 та основної площини; вісь oy утвориться перетинанням площини мідель-шпангоута й основної площини, позитивним її напрямком є напрямок на правий борт; вісь oz є лінією перетину діаметральної площини і площини мідель-шпангоута, позитивним її напрямком вважається напрямок угору. Таким чином, площина xoy є основною площиною, площина xoz – діаметральною площиною і площина oyz – площиною мідель-шпангоута.

2.1.3.1. Параметри, що визначають посадку судна. У загальному випадку площина діючої ватерлінії не паралельна основній площині. Це т. зв. випадок посадки судна по "довільну ватерлі-

нію". Положення "довільної ватерлінії" в обраній системі координат визначається наступними параметрами (рис. 2.3): осадкою T_M – висотою точки перетину площини "довільної ватерлінії" з віссю oz ; кутом диференту θ – кутом між віссю ox і слідом ВЛ на площині xoz ; кутом крену ϕ – кутом між віссю oy і слідом ВЛ на площині yoz .

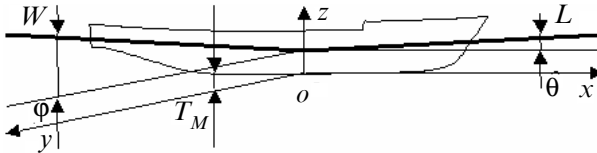


Рис. 2.3. Параметри посадки судна

2.1.3.2. Випадки посадки судна. Розглянутий випадок посадки судна по "довільну ватерлінію" є найбільш загальним. Якщо кут крену дорівнює нулю, говорять, що судно сидить без крену (прямо). Якщо дорівнює нулю кут диференту, говорять, що судно сидить без диференту (на рівний кіль). Говорять, що судно сидить прямо й на рівний кіль, якщо дорівнюють нулю і кут крену, і кут диференту.

2.1.3.3. При нахиленнях судна в діаметральній площині разом з осадкою T_M і кутом диференту θ розглядаються осадка носом T_F і осадка кормою T_A , які вимірюються на носовому й кормовому перпендикулярах:

$$T_F = T_M + (L/2 - x_{CF}) \theta; \quad T_A = T_M - (L/2 + x_{CF}) \theta, \quad (2.29)$$

де L – довжина судна між перпендикулярами. При цьому різниця між осадками кормою і носом утворює диферент судна:

$$t_s = T_A - T_F. \quad (2.30)$$

2.2. Практичні відомості

2.2.1. Експериментальне визначення опору води руху моделі судна. Опір води руху моделі судна вважається відомим, якщо визначається залежність сили опору від швидкості руху моделі судна. Така залежність встановлюється в результаті здійснення серії буксирувань моделі, прикріпленої до буксирувального візка. У кожному з буксирувань підтримується однаковий (типовий) режим руху візка вздовж дослідного басейну. При цьому початкова

ділянка руху буксирувального візка називається "розгінною", середня – "ділянкою усталеного руху", заключна – "гальмовою". Типова залежність швидкості буксирувального візка від часу t або шляху $s(t)$, пройденого вздовж дослідного басейну, представлена на рис. 2.4.

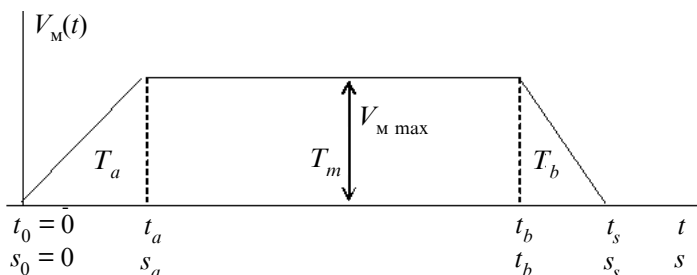


Рис. 2.4. Спрощена типова залежність від часу t і пройденого шляху $s(t)$ швидкості $V_M(t)$ руху моделі судна в дослідному басейні:

$$\begin{aligned} T_a &= t_a - t_0 \text{ – час прискореного руху;} \\ T_m &= t_b - t_a \text{ – час усталеного руху;} \\ T_b &= t_s - t_b \text{ – час гальмування} \end{aligned}$$

Для визначення залежності сили опору води руху моделі судна від її швидкості швидкість руху буксирувального візка "вперед" на "ділянці усталеного руху" $V_{M \max}$ у процесі повторення буксирувань моделі східчато мініється в діапазоні швидкостей від $V_{M \max} = 0$ до $V_{M \max} = (V_{M \max})_{\max}$. При цьому максимальна швидкість $(V_{M \max})_{\max}$ заданої кількості N_v східчатої зміни швидкості $V_{M \max}$, пов'язаної із заданою кількістю N_t (10...20) буксирувань моделі судна, визначається масштабом моделі судна, але завжди залишається менше від максимальної швидкості буксирувального візка $V_{t \max}$, обумовленої обмеженнями за масою моделі. Одна із залежностей дослідження ходовості судна отримана в результаті проведення серії буксирувань моделі масою представлена на рис. 2.5.

Зворотні переміщення буксирувального візка "назад" у вихідне положення на початку дослідного басейну виконуються в такій же послідовності, як і переміщення "вперед", однак завжди здійснюються з постійною на "ділянці усталеного руху" швидкістю $V_{M \max} = V_{t \min}$.

Перед кожним буксируванням моделі "вперед" або "назад"

у процесі руху буксирувального візка робляться тимчасові перерви тривалістю 1...3 хв для природного заспокоєння обуреного руху рідини.

Опір руху моделі $R_{\text{хм}}$, Н

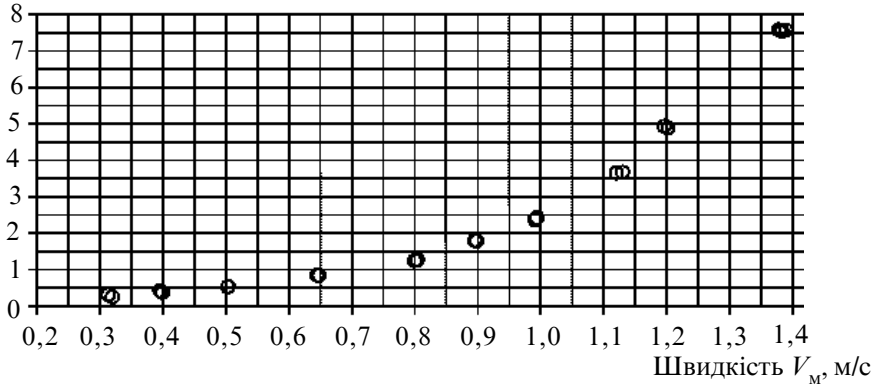


Рис. 2.5. Залежність поздовжньої сили – сили опору води руху моделі портового буксира $R_{\text{хм}}$ від швидкості V_m руху моделі

2.2.2. Способи експериментального визначення опору води руху моделі судна

2.2.2.1. Ручний спосіб визначення опору води руху моделі судна реалізується при перемиканні тумблера режимів руху буксирувального візка в положення "Ручне керування рухом візка". При цьому швидкість руху візка на ділянці "усталеного руху" задається за допомогою потенціометра – регулятора швидкості руху візка, розташованого на лицьовій панелі пульта керування електроприводом – пульта перетворювача частоти. Натисканням кнопок "уперед" або "назад" забезпечується відповідний рух візка. Наприкінці пробігу "вперед" або "назад" візок зупиняється в результаті роботи кінцевих вимикачів. Кнопка "стоп" призначена для змусованої або аварійної зупинки візка.

Швидкість руху моделі та сила опору води руху моделі визначаються за допомогою датчика швидкості візка й датчика поздовжньої сили трикомпонентного динамометра. Сигнали цих датчиків запам'ятовуються й обробляються контролером швидкості руху моделі та контролером сил, діючих на модель. Після повернення буксирувального візка в початкове положення контролер, розта-

шований на буксирувальному візку, за допомогою спеціального рознімання з'єднується з комп'ютером. При цьому усереднене за час руху моделі на ділянці "усталеного руху" значення швидкості моделі й поздовжньої сили представляються на екрані комп'ютера.

Одержувані після кожного буксирування усереднені значення швидкості руху моделі й сили опору моделі вручну заносяться у відповідну таблицю протоколу буксирувальних випробувань.

2.2.2.2. Автоматичне керування рухом буксирувального візка здійснюється за допомогою програми керування перетворювачем частоти, що інсталюється на персональному комп'ютері.

За допомогою цієї програми задаються: $(V_{\text{м max}})_{\text{max}}$ – максимальна швидкість руху буксирувального візка в серії буксирувань, м/с; $N \geq 3$ – кількість буксирувань серії; T_F – проміжок часу відстою буксирувального візка після пробігу "вперед", с; T_B – проміжок часу відстою буксирувального візка після пробігу "назад", с.

Під час кожного з буксирувань швидкості руху моделі та сила опору води руху моделі визначаються датчиками швидкості буксирувального візка й поздовжньої сили трикомпонентного динамометра. Сигнали цих датчиків запам'ятовуються й обробляються контролером швидкості руху моделі, розміщеному в корпусі перетворювача частоти, і контролером сил, діючих на модель, розміщеному на буксирувальному візку. Після повернення буксирувального візка в початкове положення контролер, розташований на буксирувальному візку, за допомогою спеціального рознімання з'єднується з комп'ютером. При цьому записи усередненого за час руху моделі на ділянці "усталеного руху" значення швидкості моделі та сигналів датчиків діючих сил переносяться на комп'ютер і представляються на екрані комп'ютера.

Одержувані після кожного буксирування усереднені значення швидкості руху моделі та сили опору моделі автоматично заносяться у відповідну таблицю протоколу буксирувальних випробувань.

Після закінчення серії буксирувань накопичені дані усереднених значень швидкості руху моделі та сили опору моделі представляються у файлі комп'ютера у табличному й графічному вигляді.

2.2.3. Способи визначення посадки судна при ході на тихій воді

2.2.3.1. Визначення змін посадки судна за допомогою модельного експерименту з вертикальними лініями. Рух судна та його моделі

повільній поверхні рідини супроводжується появою ходового спливання і ходового диференту.

При цьому осадка моделі $T_{ММ}$, кут ходового диференту моделі θ_{VM} , осадка моделі носом T_{FM} і осадка моделі кормою T_{AM} змінюються на величини δT_M , $\delta\theta_{VM}$, δT_{FM} і δT_{AM} відповідно.

Для визначення змін куту диференту моделі при ході на тихій воді та її осадки на носовому й кормовому краях моделі встановлюються вертикальні лінійки (рис. 2.6), за допомогою яких визначається положення країв моделі щодо горизонтальної планки, жорстко закріпленої на візку.

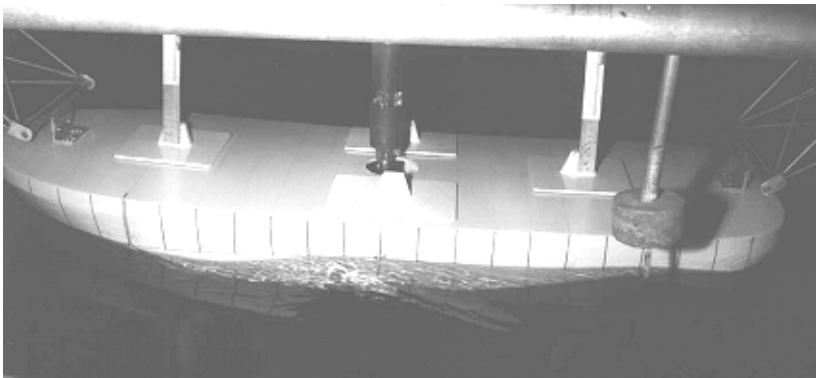


Рис. 2.6. Визначення ходових змін посадки моделі за допомогою фотоапарата і двох вертикальних лінійок, установлюваних на краях моделі

При відомих відстанях від мідель-шпангоута до носової та кормової лінійок L_{1FM} , L_{2AM} і обмірюваних значеннях змін у показаннях лінійок δT_{1FM} , δT_{2AM} ходові збільшення осадки носом та кормою моделі визначаються за формулами

$$\delta T_{FM} = \delta T_{1FM} (L_M / L_{1FM}) / 2; \quad \delta T_{AM} = \delta T_{1AM} (L_M / L_{1AM}) / 2. \quad (2.31)$$

Зміни осадки моделі, її диференту й кута диференту визначаються за допомогою співвідношень

$$\delta T_M = (\delta T_{FM} + \delta T_{AM}) / 2; \quad \delta t_{SM} = \delta T_{AM} - \delta T_{FM}; \quad \delta\theta_{VM} = \delta t_{SM} / L_M. \quad (2.32)$$

При проведенні серії буксирувань моделі з різними швидкостями визначаються залежності від швидкості руху моделі змін у показаннях лінійок та величин, які обчислюються за формулами

(2.31) і (2.32). Такі залежності представляються в табличній формі й у вигляді графіків. Приклад експериментальної залежності ходового диференту моделі судна від швидкості її ходу представлений на рис. 2.7.

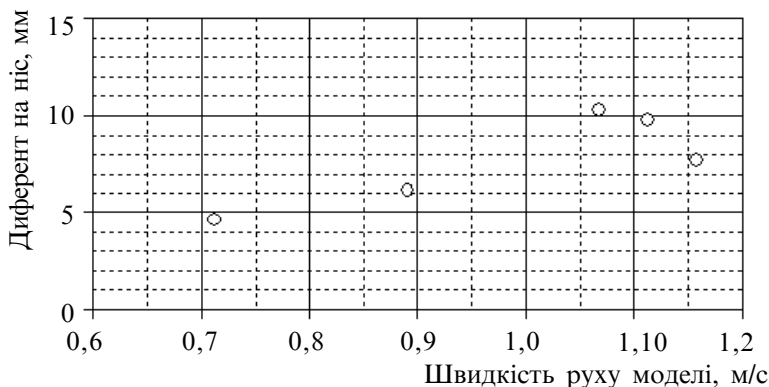


Рис. 2.7. Експериментальна залежність ходового диференту моделі портового буксира від швидкості руху

2.2.3.2. Визначення змін посадки моделі судна за допомогою датчика вертикальних переміщень моделі й датчика її кута диференту. При автоматичному визначенні збільшень осадки моделі судна та кута її диференту використовуються датчик вертикального переміщення й датчик кутового переміщення моделі, які розташовуються в державці моделі.

У зв'язку із цим, основними кінематичними реєстрованими характеристиками руху й позиціонування моделі судна є: швидкість поступального руху моделі V_m ; вертикальне переміщення моделі судна щодо незбуреного рівня вільної поверхні рідини в дослідному басейні δT_m ; кут ходового диференту моделі судна $\delta \theta_{V_m}$.

Сигнали датчиків швидкості поступального руху моделі та положення моделі щодо незбуреної вільної поверхні рідини запам'ятовуються й обробляються контролером швидкості руху моделі, розміщеному в корпусі перетворювача частоти, і контролером датчиків моделі, розміщеному на буксирувальному візку. Після повернення буксирувального візка в початкове положення контролер, розташований на візку, за допомогою спеціального рознімання з'єднується з комп'ютером. При цьому записи усереднених сигналів датчиків за час руху моделі на ділянці "усталеного руху"–

значення швидкості моделі, її вертикального переміщення й ходового диференту – переносяться на комп'ютер. Усереднені значення швидкості моделі, її вертикального переміщення й ходового диференту також представляються на екрані комп'ютера.

Одержувані після кожного буксирування усереднені значення швидкості руху моделі, її вертикального переміщення й ходового диференту автоматично заносяться у відповідну таблицю протоколу буксирувальних випробувань (табл. 2.1).

Після закінчення серії буксирувань накопичені дані усереднених значень швидкості руху моделі, її вертикального переміщення й ходового диференту представляються у файлі комп'ютера у табличному й графічному вигляді.

Якщо державка прикріплюється до моделі таким чином, що її вертикальна вісь, яка збігається з віссю датчика вертикальних переміщень, виявляється на відстані L_h від площини мідель-шпангоута, то зміна осадки моделі судна δT_M визначається за формулою

$$\delta T_M = \delta T_{mk} - L_h \delta \theta_{V_M}, \quad (2.33)$$

де δT_{mk} – показання датчика вертикального переміщення моделі, м.

2.3. Протокол буксирувальних випробувань моделі судна

№ 009 Дата: 18.04.2005

Вихідні дані моделі

Проект	Буксир 01-04
Масштаб моделі,	$1/l = 1/33,3$
Довжина моделі, м	$L_M = 0,942$
Ширина моделі, м	$B_M = 0,356$
Осадка моделі, м	$T_M = 0,108$
Коефіцієнт загальної повноти	$C_{B_M} = 0,540$
Коефіцієнт повноти площі ватерлінії	$C_{WPM} = 0,880$
Коефіцієнт повноти площі мідель-шпангоута	$C_{MM} = 0,840$
Площа змоченої поверхні моделі, м ²	$S_{WM} = 0,360$
Площа діаметрального батокса моделі, м ²	$S_{CPM} = 0,087$
Абсциса центру ваги площі ватерлінії, м	$x_{CFM} = -0,018$
Абсциса центру ваги, м	$x_{CGM} = -0,014$
Діаметр турбулізатора, мм	$d_t = 1,500$

Характеристики початкової посадки моделі

Кут дрейфу моделі, град	$\beta_{0M} = 0,000$
-------------------------	----------------------

Початковий кут диференту моделі, град
Відстань осі державки моделі від мідель-шпан-
гоута, м

$$\theta_{0M} = 0,000$$

$$L_h = -0,014$$

Умови експерименту

Температура води в басейні, °C

$$t^{\circ}_W = 17,50$$

Кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с

$$\nu_M = 0,00000112$$

Щільність води в басейні, т/м³

$$\rho_M = 1,000$$

Таблиця 2.1. Результати буксировань

Номер букси- рування	Показання приладів					
	Швидкість моделі	Сила опору	Сила дрейфу	Момент сили дрейфу	Ходове спливання	Кут ходового диференту
	V_M , м/с	R_{XM} , Н	R_{YM} , Н	M_{zM} , Н·м	δT_M , мм	$\delta \theta_{VM}$, град
1	0,320	0,251	0,000	0,000	-0,5	-0,05
2	0,395	0,430	0,000	0,000	-1,0	-0,04
3	0,503	0,528	0,000	0,000	0,0	0,05
4	0,645	0,850	0,000	0,000	4,5	0,22
5	0,804	1,270	0,000	0,000	7,7	0,35
6	0,898	1,787	0,000	0,000	9,0	0,40
7	0,994	2,432	0,000	0,000	11,9	0,53
8	1,130	3,673	0,000	0,000	12,9	0,56
9	1,202	4,896	0,000	0,000	13,5	0,47
10	1,389	7,582	0,000	0,000	13,9	0,30

Експеримент виконали _____

Лабораторна робота № 3

ПЕРЕРАХУВАННЯ НА НАТУРУ ДАНИХ БУКСИРУВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ МОДЕЛІ СУДНА БЕЗ КУТА ДРЕЙФУ

Мета роботи: визначення характеристик опору води руху судна по вільній поверхні рідини і його посадки під час руху на основі даних експериментальних досліджень руху моделі.

3.1. Теоретичні відомості

3.1.1. Методика перерахування даних експериментальних досліджень опору. В основу перерахування даних експериментальних досліджень опору води руху моделі судна покладена теорія динамічної подоби потоків, елементи якої викладені у ЛР № 2.

Відповідно до цієї теорії при експериментальному дослідженні опору води руху судна моделюється тільки залишковий опір, опори тертя моделі й натури визначаються розрахунковим шляхом. При розрахунку опору тертя модель і судно замінюються еквівалентними гладкими пластинами.

Перерахування результатів модельних випробувань на натуру здійснюється в такий спосіб.

1. Розрахунковим шляхом визначається опір тертя моделі:

$$R_{FM} = C_{F0M} \frac{\rho_m V_m^2}{2} S_m, \quad (3.1)$$

де C_{F0M} – коефіцієнт опору тертя моделі, обумовлений як коефіцієнт опору пластини при обтіканні її турбулентним прикордонним потоком:

$$C_{F0M} = 0,455/(\lg Re_m)^{2,58}; \quad Re_m = V_m L_m / \nu_m, \quad (3.2)$$

де ρ_m – щільність води в дослідному басейні; ν_m – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини в басейні; V_m – швидкість моделі; L_m – довжина моделі; S_m – площа змоченої поверхні моделі.

2. Залишковий опір моделі визначається як різниця повного опору, отриманого в експерименті, та опору тертя:

$$R_{RM} = R_m - R_{FM}. \quad (3.3)$$

3. Визначається коефіцієнт залишкового опору моделі:

$$C_{RM} = R_{RM} / \left(\frac{\rho_m V_m^2}{2} S_m \right). \quad (3.4)$$

4. Коефіцієнт опору тертя натури обчислюється за формулою

$$C_{F0H} = 0,455/(\lg Re_H)^{2,58}; \quad Re_H = V_H L_H / \nu_H, \quad (3.5)$$

де ν_H – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини; V_H – швидкість натури; L_H – довжина натури.

5. Коефіцієнт повного опору натюри визначається як сума коефіцієнта опору тертя натюри й коефіцієнта залишкового опору моделі:

$$C_{\text{н}} = C_{F0\text{н}} + C_{R\text{м}}. \quad (3.6)$$

У практичних розрахунках до отриманого значення коефіцієнта повного опору натюри додається надбавка на шорсткість $\Delta C_{F\text{н}}$ і надбавка на виступаючі частини $C_{PP\text{н}}$:

$$C_{T\text{н}} = C_{F0\text{н}} + C_{R\text{м}} + \Delta C_{F\text{н}} + C_{PP\text{н}}. \quad (3.7)$$

6. Значення повного опору натюри визначається за допомогою наступного виразу:

$$R_{T\text{н}} = C_{T\text{н}} \frac{\rho_{\text{н}} V_{\text{н}}^2}{2} S_{\text{н}}. \quad (3.8)$$

3.2. Практичні відомості

3.2.1. Перерахування результатів експериментального дослідження опору. Відповідно до вищевикладених формул здійснюється перерахування на натюру даних експериментального дослідження опору води руху моделі судна, занесених до протоколу буксирувальних випробувань моделі судна.

Приклад перерахування результатів експериментального дослідження опору води руху моделі судна, здійсненого на основі даних протоколу буксирувальних випробувань моделі судна, отриманих при виконанні ЛР № 2 (див. табл. 2.1), наведений у табл. 3.1.

Занесені в табл. 3.1 вихідні дані щодо швидкостей буксування і відповідних цим швидкостям значень повного опору моделі судна відповідають згладженій кривій опору моделі, яка одержана в результаті статистичної обробки експериментальних даних, наведених у табл. 2.1 (дод. 2). Розрахунок повного опору натурного судна і його буксирувальної потужності зроблений у табл. 3.2.

3.2.2. Перерахування результатів експериментального дослідження посадки судна при ході на тихій воді. Для натурного судна шуканими величинами є: осадка $T_{M\text{н}}$; осадка носом $T_{F\text{н}}$; осадка кормою $T_{A\text{н}}$; диферент $t_{\text{сн}}$; кут диференту $\theta_{V\text{н}}$. Відповідно до теорії кут диференту натюри $\theta_{V\text{н}}$ при швидкості ходу натюри, обумовленої за формулою

$$V_H = V_M \sqrt{l}, \quad (3.9)$$

де V_M – швидкість ходу моделі, виконаної в масштабі $l = L_H / L_M$, дорівнюється куту диференту моделі θ_{VM} .

Таким чином, кутові характеристики посадки судна при ході на тихій воді не потребують перерахування. Зміна ж лінійних розмірів при переході від моделі до натури потребує використання масштабу l .

Приклад перерахування результатів експериментального дослідження посадки судна при його ході на тихій воді, здійсненого на основі даних протоколу буксирувальних випробувань моделі судна, отриманих при виконанні ЛР № 2 (див. табл. 2.1), наведений у табл. 3.3.

3.3. Протокол перерахування результатів буксирувальних випробувань на натуру

№ 010 Дата: 18.04.2006

Вихідний документ

Протокол буксирувальних випробувань моделі судна № 009 від 18.04.2005

Відомості про натурне судно

Проект	Буксир 01-04
Довжина судна, м	$L_H = 31,400$
Ширина судна, м	$B_H = 11,850$
Осадка судна, м	$T_H = 3,600$
Площа змоченої поверхні, м ²	$S_{WH} = 400,0$
Площа діаметрального батокса, м ²	$S_{CPH} = 0,086$
Абсциса центру ваги площі ватерлінії, м	$x_{CFH} = -0,61$
Абсциса центру ваги судна, м	$x_{CGH} = -0,45$

Експлуатаційні характеристики

Розрахункова щільність води, т/м ³	$\rho_H = 1,025$
Кінематичний коефіцієнт в'язкості, м ² /с	$\nu_H = 1,57 \text{ E-}06$
Коефіцієнт опору виступаючих частин	$C_{PPH} = 4,00 \text{ E-}04$
Коефіцієнт опору шорсткості	$\Delta C_{FH} = 6,00 \text{ E-}04$

Таблиця 3.1. Визначення опору натур

№	$V_{\text{м}^3}$ з/п	Fr	$R_{\text{хмб}}$ Н	$C_{\text{хм}}$	$\text{Re}_{\text{м}}$	$C_{\text{f0м}}$	$C_{\text{Rм}}$	$V_{\text{нб}}$ м/с	$\text{Re}_{\text{н}}$	$C_{\text{f0н}}$	$C_{\text{хн}}$	$R_{\text{хн}}$ кН	$V_{\text{кнб}}$ вузли
1	0,4	0,13	0,40	1,39 E-02	3,36 E+05	5,53 E-03	8,36 E-03	2,31	4,62 E+07	2,38 E-03	1,07 E-02	11,74	4,49
2	0,5	0,16	0,58	1,29 E-02	4,21 E+05	5,28 E-03	7,60 E-03	2,89	5,77 E+07	2,30 E-03	9,91 E-03	16,92	5,62
3	0,6	0,20	0,80	1,23 E-02	5,05 E+05	5,10 E-03	7,25 E-03	3,46	6,93 E+07	2,24 E-03	9,49 E-03	23,35	6,74
4	0,7	0,23	1,08	1,22 E-02	5,89 E+05	4,95 E-03	7,30 E-03	4,04	8,08 E+07	2,19 E-03	9,49 E-03	31,78	7,86
5	0,8	0,26	1,40	1,22 E-02	6,73 E+05	4,82 E-03	7,33 E-03	4,62	9,24 E+07	2,15 E-03	9,49 E-03	41,48	8,99
6	0,9	0,30	1,92	1,32 E-02	7,57 E+05	4,71 E-03	8,46 E-03	5,20	1,04 E+08	2,12 E-03	1,06 E-02	58,52	10,10
7	1,0	0,33	2,68	1,49 E-02	8,41 E+05	4,62 E-03	1,03 E-02	5,77	1,15 E+08	2,09 E-03	1,24 E-02	84,43	11,20

Таблиця 3.2. Повний опір і буксирувальна потужність судна

$V_{\text{кнб}}$ вузли	4,493	5,616	6,739	7,863	8,986	10,109	11,232
$C_{\text{хн}}$	1,07 E-02	9,91 E-03	9,49 E-03	9,49 E-03	9,49 E-03	1,06 E-02	1,24 E-02
$C_{\text{тн}}$	1,17 E-02	1,09 E-02	1,05 E-02	1,05 E-02	1,05 E-02	1,16 E-02	1,34 E-02
$R_{\text{тнб}}$ кН	12,84	18,63	25,81	35,13	45,86	64,06	91,27
$P_{\text{Енб}}$ кВт	29,64	53,78	89,40	141,98	211,80	332,86	526,92
$10R_{\text{тнб}}$ кН	128,35	186,31	258,07	351,32	458,56	640,59	912,66

У таблиці 3.2 $C_T = C_x + C_{PP} + \Delta C_F$.

Таблиця 3.3. Характеристики посадки судна при ході на тихій воді

$V_{\text{мз}}$ м/с	0,00	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$V_{\text{КМвз}}$ вузли	0,00	4,49	5,62	6,74	7,86	8,99	10,11	11,23
$T_{\text{Мвз}}$ м	3,60	3,60	3,57	3,62	3,70	3,77	3,85	3,92
$T_{\text{Фвз}}$ м	3,60	3,60	3,56	3,63	3,74	3,83	3,95	4,04
$T_{\text{Авз}}$ м	3,60	3,60	3,58	3,61	3,66	3,70	3,75	3,79
$t_{\text{звз}}$ м	0,00	0,00	-0,02	0,02	0,08	0,14	0,20	0,25
$\theta_{\text{гвз}}$ град	0,00	0,00	-0,04	0,04	0,14	0,25	0,36	0,46

Перерахування виконали _____

БУКСИРУВАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛІ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ ПРИ ЇЇ РУСІ З КУТОМ ДРЕЙФУ

Мета роботи: експериментальне визначення поздовжньої сили опору, бічної сили й моменту бічної сили при русі моделі судна по вільній поверхні рідини з кутом дрейфу.

4.1. Теоретичні відомості

4.1.1. Системи координат. При русі судна з не рівним нулю кутом дрейфу воно розглядається як крило малого розмаху вертикально опущене у воду й розташоване під деяким кутом атаки β до потоку, що набігає (рис. 4.1).

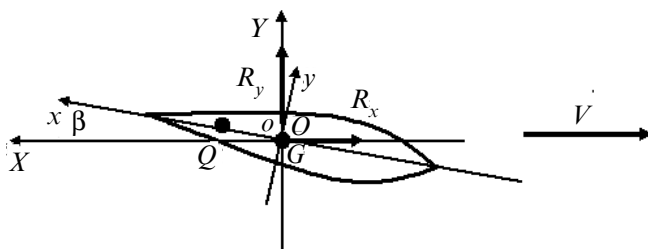


Рис. 4.1. Рух судна з кутом дрейфу β

Тому опис руху судна й діючих на нього сил здійснюється з позицій теорії крила. У цій теорії вводиться абсолютна система координат OXY і жорстко пов'язана з тілом система oxy , що зображені на рис. 4.1.

Вісь OX абсолютної системи координат сполучається з напрямком потоку рідини, що набігає на судно. Початок жорстко пов'язаної із судном системи координат oxy – точка o , розташовується в центрі ваги судна – точці G .

Із залученням понять теорії крила поздовжня сила опору води поступальному руху судна R_x приймає зміст сили лобового опору крила, а бічна сила R_y або сила, що викликає дрейф судна, є аналогом підйомної сили крила. Ці сили є проекціями гідродинамічної сили Q , що діє на судно, на осі абсолютної системи координат, одна з яких збігається з напрямком потоку рідини, що набігає.

4.1.2. Сили, діючі на судно. У системі координат, жорстко пов'язаною із судном, гідродинамічна сила Q вважається прикладеною в точці Q . Відносно початку системи координат, жорстко

пов'язаної із судном, сила Q створює момент M_z , що при малих кутах дрейфу обчислюється за наступною наближеною формулою:

$$M_z \approx Q x_Q \approx R_y x_Q, \quad (4.1)$$

де x_Q – абсциса точки дії Q гідродинамічної сили Q .

У стаціонарних потоках рідини або у квазістаціонарних потоках, при розгляді яких зміни в часі швидкості рідини можна не враховувати, проекції сили Q та її моменту щодо точки G визначаються за формулами

$$R_x = C_x \frac{\rho V^2}{2} S; \quad (4.2) \quad R_y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S; \quad (4.3)$$

$$M_z = C_m \frac{\rho V^2}{2} SL, \quad (4.4)$$

де C_x – коефіцієнт поздовжньої сили; C_y – коефіцієнт бічної сили; C_m – коефіцієнт моменту; S – площа проекції підводної частини корпусу судна на діаметральну площину (площа діаметрального батокса); L – довжина зануреної у воду частини корпусу судна.

4.2. Моделювання руху судна з кутом дрейфу

При відмінному від нуля куті дрейфу моделювання діючих на судно сил здійснюється відповідно до теорії динамічної подоби потоків, короткий зміст якої викладено у ЛР № 2.

При цьому передбачається, що вплив явищ на вільній поверхні рідини таких, як хвилювання при русі судна, на сили, що формуються на зануреній у воду частини корпусу судна, незначний. Це дозволяє відобразити занурену частину корпусу судна у верхній півпростір і представити судно як крило, що рухається в безмежній рідині та розмах якого дорівнюється двом осадкам.

У цьому випадку моделювання руху моделі, так само як і моделювання її руху при рівному нулю куті дрейфу, можна здійснювати відповідно до критерію подоби за числом Фруда (2.16). Хоча ця вимога за схемою руху дубльованого корпусу не пред'являється.

Використання такої схеми переводить проблему моделювання руху судна по вільній поверхні рідини в проблему моделювання руху крила в безмежній рідині. Це приводить до того, що значення безрозмірних коефіцієнтів проекцій гідродинамічної сили та її моменту, що діє на судно при його русі з постійним кутом дрейфу, в першому наближенні виявляються рівними значенням ана-

логічних безрозмірних коефіцієнтів, отриманих у результаті експериментальних досліджень стаціонарного руху моделі.

Для проєкцій гідродинамічної сили та її моменту це означає, що виконуються наступні рівності:

$$C_{xH} = C_{xM}; \quad C_{yH} = C_{yM}; \quad C_{mH} = C_{mM}. \quad (4.5)$$

4.3. Практичні відомості

У модельному експерименті кут дрейфу встановлюється за допомогою поворотного пристрою, розташованого між державкою моделі й трикомпонентним динамометром.

Модель зазвичай прикріплюється до державки таким чином, щоб її вертикальна вісь проходила через положення центру ваги натурального судна.

При заданому куті дрейфу послідовність виконання лабораторної роботи й форма протоколу буксирувальних випробувань залишаються такими ж, як і ті, що наведені в ЛР № 2 (див. табл. 2.1).

Серія буксирувань із заданою послідовністю кутів дрейфу виконується шляхом поетапної зміни цього кута за допомогою зазначеного поворотного пристрою. При цьому швидкість буксирування моделі для кожного кута дрейфу може залишатися однаковою, як, наприклад, того вимагає перевірка здатності буксира виконувати ескортну операцію, або змінюватися в певному діапазоні.

Таким чином, у загальному випадку підсумкові результати буксирувань при виконанні серії буксирувань із заданою послідовністю кутів дрейфу представляються серією однотипних протоколів буксирувальних випробувань моделі судна.

Лабораторна робота № 5

ПЕРЕРАХУВАННЯ НА НАТУРУ ДАНИХ БУКСИРУВАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ МОДЕЛІ СУДНА З КУТОМ ДРЕЙФУ

Мета роботи: визначення характеристик бічної сили, що діє на судно при його русі з кутом дрейфу, і точки її дії в системі координат, жорстко пов'язаної із судном, на основі даних експериментальних досліджень руху моделі.

5.1. Теоретичні відомості

5.1.1. Методика перерахування даних експериментальних досліджень бічної сили. В основу перерахування даних експериментальних досліджень бічної сили, що виникає на корпусі судна при його русі з постійною швидкістю й постійним кутом дрейфу, покладена теорія динамічної подоби потоків безмежної рідини, що обтікає крило і його модель. Відповідно до цієї теорії, при експериментальному дослідженні руху судна з постійним кутом дрейфу, значення безрозмірних коефіцієнтів проєкцій гідродинамічної сили та її моменту, діючих на судно, у першому наближенні виявляються рівними значенням аналогічних безрозмірних коефіцієнтів, отриманих у результаті експериментальних досліджень стаціонарного руху моделі судна [2; 3].

Це приводить до того, що для проєкцій гідродинамічної сили та її моменту виконуються рівності, аналогічні до (4.5).

При використанні цих рівностей перерахування результатів модельних випробувань на натуру здійснюється в такий спосіб.

1. На основі даних модельного експерименту за R_{xM} , R_{yM} і M_{zM} визначаються безрозмірні коефіцієнти:

$$C_{xM} = R_{xM} / \left(\frac{\rho_M V_M^2}{2} S_M \right); \quad (5.1) \quad C_{yM} = R_{yM} / \left(\frac{\rho_M V_M^2}{2} S_M \right); \quad (5.2)$$

$$C_{zM} = M_{zM} / \left(\frac{\rho_M V_M^2}{2} S_M L_M \right). \quad (5.3)$$

2. Відношення абсциси точки дії бічної сили x_{QM} до довжини моделі L_M обчислюється за формулою

$$\frac{x_{QM}}{L_M} = \frac{C_{zM}}{C_{xM} \sin \beta + C_{yM} \cos \beta}. \quad (5.4)$$

3. Для обчислення бічної сили натуре та її моменту використовуються

$$R_{yH} = C_{yH} \frac{\rho_H V_H^2}{2} S_H; \quad (5.5) \quad M_{zH} = C_{zH} \frac{\rho_H V_H^2}{2} S_H L_H. \quad (5.6)$$

4. При визначенні абсциси точки дії бічної сили в системі ко-

ординат, жорстко пов'язаної із судном, використовується результат, отриманий за формулою (5.4):

$$x_{QH} = (x_{QM} / L_M) L_H. \quad (5.7)$$

5.2. Практичні відомості

Відповідно до вищевикладених формул здійснюється перерахування на натуру даних за експериментальним дослідженням сил, діючих на судно при його русі з кутом дрейфу. Вихідними є значення проекцій гідродинамічної сили моделі та її моменту, занесені в протоколі буксирувальних випробувань моделі судна.

Приклад перерахування результатів експериментального визначення бічної сили та її точки дії в системі координат, жорстко пов'язаної із судном, здійсненого на основі буксирувальних випробувань моделі буксира, при виконанні яких швидкість руху моделі при різних кутах дрейфу підтримувалася постійною, відповідною максимальній швидкості ескортної операції, наведений у табл. 5.1.

5.3. Протокол перерахування результатів буксирувальних випробувань на натуру

№ 011 Дата: 18.04.2006

Вихідний документ

Протокол буксирувальних випробувань моделі судна № 010 від 18.04.2005

Відомості про натурне судно

Проект	Буксир 01-04
Довжина судна, м	$L_H = 31,400$
Ширина судна, м	$B_H = 11,850$
Осадка судна, м	$T_H = 3,600$
Площа змоченої поверхні, м ²	$S_{WH} = 400,0$
Площа діаметрального батокса, м ²	$S_{CPH} = 95,4$
Абсциса центру ваги площі ватерлінії, м	$x_{CFH} = -0,61$
Абсциса центру ваги судна, м	$x_{CGH} = -0,45$
<i>Експлуатаційні характеристики</i>	
Розрахункова щільність води, т/м ³	$\rho_H = 1,025$
Кінематичний коефіцієнт в'язкості, м ² /с	$\nu_H = 1,57 \text{ E-}06$
Коефіцієнт опору виступаючих частин	$C_{PPH} = 4,00 \text{ E-}04$
Коефіцієнт опору шорсткості	$\Delta C_{FH} = 6,00 \text{ E-}04$

Таблиця 5.1. Визначення поздовжньої FB і бічної FS сил буксира при швидкості $V_{КН} = 8,0$ вуз/ів

№ з/п	Бічна сила					Поздовжня сила								
	Модель			Натура		Модель				Натура				
	$V_{\text{м}},$ м/с	Кут, град	$FS_{\text{м}},$ Н	$C_{FS\text{м}}$	$V_{\text{н}},$ м/с	$FS_{\text{н}},$ Н	$V_{\text{м}},$ м/с	Кут, град	$FB_{\text{м}},$ Н	$C_{FB\text{м}}$	$V_{\text{н}},$ м/с	$FB_{\text{н}},$ Н		
1	0,72	0	0,000	0,00 E+00	4,16	0,00 E+00	0,000	0,72	0	-1,078	-4,84 E-02	4,16	-4,84 E-02	-36,824
2	0,72	5	1,473	6,61 E-02	4,16	6,61 E-02	50,32	0,72	5	-1,277	-5,73 E-02	4,16	-5,73 E-02	-43,608
3	0,72	10	3,437	1,54 E-01	4,16	1,54 E-01	117,4	0,72	10	-1,964	-8,81 E-02	4,16	-8,81 E-02	-67,089
4	0,72	15	5,303	2,38 E-01	4,16	2,38 E-01	181,1	0,72	15	-2,651	-1,19 E-01	4,16	-1,19 E-01	-90,570
5	0,72	20	7,070	3,17 E-01	4,16	3,17 E-01	241,5	0,72	20	-3,732	-1,67 E-01	4,16	-1,67 E-01	-127,468
6	0,72	25	8,838	3,96 E-01	4,16	3,96 E-01	301,9	0,72	25	-5,794	-2,60 E-01	4,16	-2,60 E-01	-197,911
7	0,72	30	9,800	4,40 E-01	4,16	4,40 E-01	334,8	0,72	30	-7,595	-3,41 E-01	4,16	-3,41 E-01	-259,439
8	0,72	35	10,653	4,78 E-01	4,16	4,78 E-01	363,9	0,72	35	-10,29	-4,62 E-01	4,16	-4,62 E-01	-351,498
9	0,72	40	10,682	4,79 E-01	4,16	4,79 E-01	364,9	0,72	40	-12,99	-5,83 E-01	4,16	-5,83 E-01	-443,557
10	0,72	45	11,221	5,03 E-01	4,16	5,03 E-01	383,3	0,72	45	-15,78	-7,08 E-01	4,16	-7,08 E-01	-538,963
11	0,72	50	10,780	4,84 E-01	4,16	4,84 E-01	368,2	0,72	50	-18,90	-8,48 E-01	4,16	-8,48 E-01	-645,752

Розділ 3. РУЛЬ СУДНА В СТАЦІОНАРНОМУ ПОТОЦІ

Лабораторна робота № 6

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ СУДНОВОГО РУЛЯ

Мета роботи: експериментальне визначення залежності від кута перекладки α коефіцієнтів лобового опору $C_x = f_1(\alpha)$, підйомної сили $C_y = f_2(\alpha)$ і моменту $C_m = f_3(\alpha)$ моделі суднового руля, що рухається з постійною швидкістю.

6.1. Теоретичні відомості

Судновий руль являє собою крило кінцевого подовження, розташоване в потоці рідини, що набігає. Він призначений для створення сил, що змінюють напрямок руху судна. Додаткові збурення, внесені корпусом судна й гребним гвинтом у потік рідини, що набігає на руль, змінюють значення сил, які виникають на рулі при його перекладці. Помітно вплинути на ці значення може також наявність вільної поверхні рідини над рулем, розміщення рудерпоста перед ним і т. п.

При вивченні сил, які виникають на рулі, спочатку моделюють роботу ізольованого руля, що рухається в незбуреній рідині з постійним кутом перекладки α (кутом атаки); потім роблять облік відзначених вище особливостей потоку рідини, що набігає [3].

Проекцію R_x гідродинамічної сили R , яка виникає на рулі при його розташуванні під кутом α до потоку рідини, що набігає, на

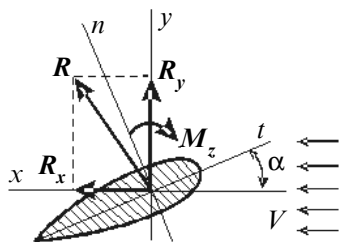


Рис. 6.1. Схема сил, діючих на руль

напрямок уздовж потоку називають силою опору руля. Проекція R_y цієї сили на напрямок, перпендикулярний швидкості потоку, називається бічною силою руля. Гідродинамічна сила R також створює момент M_z , що діє на балері руля (рис. 6.1).

Проекції діючої на руль сили та її моменту представляються в безрозмірному вигляді. Із цією метою вводяться коефіцієнт опору, коефіцієнт бічної сили і коефіцієнт моменту:

$$C_x = \frac{R_x}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_y = \frac{R_y}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_m = \frac{M_z}{\frac{\rho V^2}{2} S b},$$

де ρ – щільність рідини, т/м³; V – швидкість потоку, що набігає, м/с; S – площа проекції руля на поздовжню площину, м²; b – довжина хорди руля, м.

У системі координат, пов'язаній з рулем, у якій вісь t направляється вздовж хорди руля, а вісь n – у перпендикулярному напрямку, проекції гідродинамічної сили R можна представити у вигляді нормальної R_n і тангенціальної R_t складових. У цьому випадку вводяться в розгляд безрозмірні коефіцієнти тангенціальної і нормальної проекцій:

$$C_t = \frac{R_t}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_n = \frac{R_n}{\frac{\rho V^2}{2} S}.$$

Уведені коефіцієнти пов'язані між собою залежностями

$$C_n = C_y \cos \alpha + C_x \sin \alpha; \quad C_t = C_x \cos \alpha + C_y \sin \alpha.$$

Величини C_x , C_y , C_m , C_n , C_t називаються гідродинамічними характеристиками ізолюваного руля. Їхні значення залежно від кута перекладки для рулів різної форми представляються в довідкових посібниках у вигляді таблиць і графіків.

Для розрахунку розмірів руля, параметрів рульової машини й інших характеристик керованості судна найбільший інтерес представляють значення коефіцієнтів C_y і C_m . Щодо коефіцієнта опору руля C_x , то він разом з коефіцієнтом опору корпусу C зазвичай використовується при розрахунку ходовості судна.

Теорія тонкого крила нескінченного розмаху, що рухається в безмежній рідині з малими кутами атаки, встановлює наступну залежність:

$$C_y = 2\pi\alpha,$$

де α – кут атаки крила.

Для еліптичного крила кінцевого розмаху, в якого відносно

подовження $\lambda = l/b_{\text{сер}} = l^2/S$, де l – розмах крила; $b_{\text{сер}}$ – середнє значення хорди крила, ця ж теорія приводить до співвідношення

$$C_y = \frac{2\pi\alpha}{1 + \frac{2}{\lambda}}.$$

При малих відносних подовженнях крила λ діє формула

$$C_y = \frac{2\pi\lambda\alpha}{2 + \sqrt{\lambda^2 + 4}}.$$

Вплив тілесності руля на його підйомну силу можна врахувати виправленням $t(\delta)$, де $\delta = e/b$ – відносна товщина руля; e – максимальна товщина руля; b – хорда руля. Це виправлення представляється у вигляді графіка, наведеного на рис. 6.2.

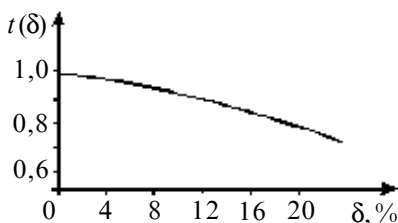


Рис. 6.2. Виправлення, що враховує вплив тілесності руля

Таким чином,

$$C_y = \frac{2\pi t(\alpha)\alpha}{1 + \frac{2}{\lambda}}.$$

При русі крила під вільною поверхнею рідини проявляється "ефект екрана", що приводить до збільшення бічної сили. Це збільшення можна врахувати, ввівши в розгляд "ефективний розмах"

$$\lambda_e = \mu \left(\frac{h_1}{l} \right) \lambda,$$

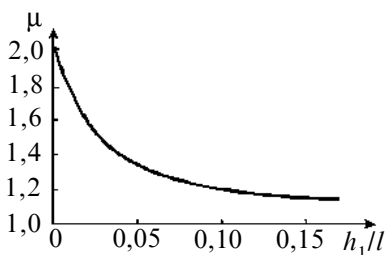


Рис. 6.3. Виправлення, що враховує вплив вільної поверхні

де h_1 – відстань верхньої крайки руля від вільної поверхні рідини; l – розмах руля.

Функція $\mu(h_1/l)$ має вигляд, обумовлений графіком, наведеним на рис. 6.3.

При розрахунках сил, діючих на руль, урахування впливу "ефекту екрана" виконується шляхом заміни в C_y параметра λ на λ_e .

6.2. Опис експериментальної установки

При проведенні лабораторної роботи використовується та ж установка, що й для виміру буксирувального опору та бічної сили моделі судна (див. ЛР № 2). Відмінність полягає в тому, що до поворотного пристрою динамометра буксирувального візка 1 кріпиться не державка моделі, а державка балера руля 2 (рис. 6.4). У процесі виконання лабораторної роботи виміряються ті ж характеристики R_x , R_y і M_z , що й для моделі судна.

6.3. Порядок проведення й обробка результатів експерименту

На першому етапі лабораторної роботи задається швидкість буксування моделі руля, що відповідає швидкості руху реального судна. Для значень кута перекладки руля α у діапазоні $0^\circ \dots 35^\circ$ з інтервалом $\Delta\alpha = 5^\circ$ виконуються буксування руля. Буксування руля супроводжуються вимірюванням сил R_x , R_y і моменту M_z за допомогою трикомпонентного динамометра буксирувального візка. За отриманими значеннями сил і моменту обчислюються коефіцієнти C_x , C_y і C_m :

$$C_x = \frac{R_x}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_y = \frac{R_y}{\frac{\rho V^2}{2} S}; \quad C_m = \frac{R_m}{\frac{\rho V^2}{2} S}$$

і будуються їхні залежності від кута перекладки руля. Криві бажано довести до тих значень, при яких явно спостерігається криза обтікання.

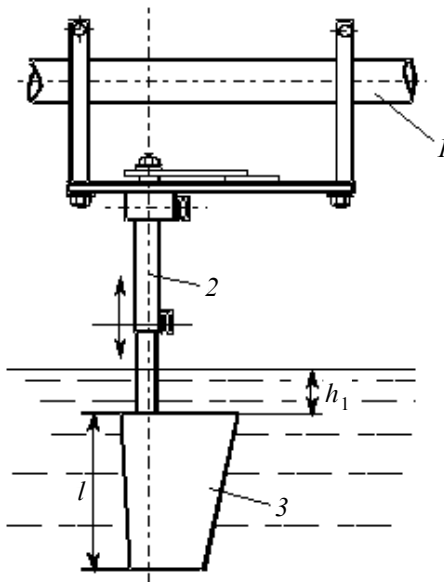


Рис. 6.4. Вузол кріплення руля до динамометра буксирувального візка:

1 – динамометр; 2 – державка руля;
3 – руль

Здійснюється порівняння експериментально отриманих значень C_y зі значеннями, розрахованими за теоретичними формулами. Результати вимірювань і обробка експерименту оформляються протоколом буксирувальних випробувань суднового руля (табл. 6.1 і 6.2).

6.4. Зміст звіту. Звіт повинен містити в собі: короткі відомості про мету й теоретичні передумови роботи; схему експериментальної установки; протокол буксирувальних випробувань; графіки залежностей $C_x = f_1(\alpha)$, $C_y = f_2(\alpha)$ і $C_m = f_3(\alpha)$; порівняння експериментальної та теоретичної залежностей $C_y = f(\alpha)$; висновки.

У висновках дається оцінка отриманих експериментальних залежностей з погляду їхньої відповідності теоретичним формулам.

6.5. Протокол буксирувальних випробувань суднового руля

№ _____ Дата: _____

Форма руля в плані _____ Температура води в басейні $t_w^\circ =$

Відносне подовження $\lambda =$ Площа пера руля в плані $S =$

Профіль перетину _____

Таблиця 6.1. Діючі сили і момент

α , град	Показання приладів				Розрахункові значення			
	V , м/с	R_x , Н	R_y , Н	M_z , Н·м	V , м/с	R_x , Н	R_y , Н	M_z , Н·м

Таблиця 6.2. Коефіцієнти діючих сил і моменту

α , град	V , м/с	Експеримент			Розрахунок		
		C_x	C_y	C_m	C_x	C_y	C_m

Буксування провели _____

Розділ 4. ГРЕБНИЙ ГВИНТ У СТАЦІОНАРНОМУ ПОТОЦІ

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ ГРЕБНОГО ГВИНТА

Мета роботи: ознайомлення з процесом роботи гребного гвинта у вільній воді; визначення гідродинамічних характеристик гребного гвинта – упору, що розвивається, моменту й коефіцієнту корисної дії (ККД).

7.1. Відомості про гідродинамічні характеристики гвинта

Якщо гребний гвинт обертався би в нерухливому твердому середовищі (як гвинт у гайці), то за один оборот він просунувся б у напрямку руху судна на відстань кроку P . Але оскільки вода має властивість плинності й не може служити твердою опорою лопаттям гвинта, то шлях, який він проходить за один оборот h_p – абсолютна хода гвинта, виявляється менше від кроку P . У зв'язку із цим, поступальна швидкість гвинта визначається за формулою

$$V_A = h_p n, \text{ м/с.}$$

Звідси

$$h_p = \frac{V_A}{n},$$

де n – частота обертання гвинта, с^{-1} .

Різниця між кроком P та абсолютною ходою h_p гвинта називається абсолютним ковзанням гребного гвинта:

$$S_A = P - h_p = P - \frac{V_A}{n}.$$

Реактивна дія води на гвинт тим більше, чим інтенсивніше він відкидає воду назад, тобто чим менше шлях h_p і більше абсолютне ковзання S_A . Відношення абсолютної ходи гвинта h_p до його діаметра D називають відносною ходою гребного гвинта:

$$I = \frac{h_p}{D} = \frac{V_A}{nD}.$$

Інакше кажучи, відносна хода гвинта показує, яку частину діаметра гвинта становить його абсолютна хода.

Розглядаючи лопать гвинта як крило кінцевого розмаху, можна відзначити, що при обертанні гвинта на елементі лопаті (рис. 7.1) виникають підйомна сила dT_y , орієнтована перпендикулярно швидкості V_R потоку, що набігає на елемент лопаті, та лобовий опір dT_x , спрямований уздовж цієї швидкості. Проектуючи dT_y і dT_x на напрямок поступального руху гвинта й окружної швидкості руху елемента, одержуємо елементарний упор dT й елементарну дотичну силу dR_S . Виникаючий на елементі момент визначається за формулою

$$dQ = dR_S r,$$

де r – радіус розглянутого елемента лопаті.

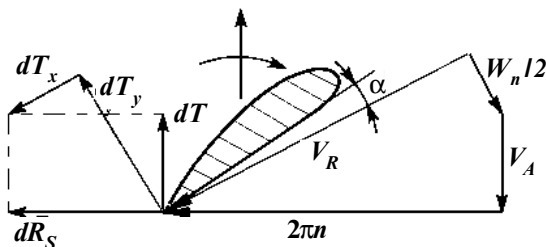


Рис. 7.1. Сили, діючі на елемент лопаті гвинта

Якщо відомі dT і dQ для різних елементів лопаті, то, проінтегрувавши їх за довжиною лопаті й помноживши на число лопатей z , можна визначити упор T і момент опору обертання Q гребного гвинта:

$$T = z \int_R dT; \quad Q = z \int_R dQ.$$

Визначається ККД гвинта за формулою

$$\eta = \frac{TV_A}{Q2\pi n},$$

де TV_A – корисна потужність гвинта; $Q2\pi n$ – потужність, затрачувана на обертання гвинта.

Упор, момент і ККД є гідродинамічними характеристиками гребного гвинта [2; 3]. Усі вони залежать від відносної ходи $I = V_A/n$.

Графіки, що виражають функціональну залежність безрозмірних гідродинамічних характеристик гвинта від відносної ходи, називаються кривими дії гвинта. Вони містять у собі криві безрозмірних коефіцієнтів упору K_T і моменту K_Q , а також криву ККД гвинта у вільній воді η_0 (рис. 7.2). Коефіцієнти K_T , K_Q і η_0 визначаються за формулами

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4};$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5};$$

$$\eta_0 = \frac{K_T \cdot I}{K_Q \cdot 2\pi},$$

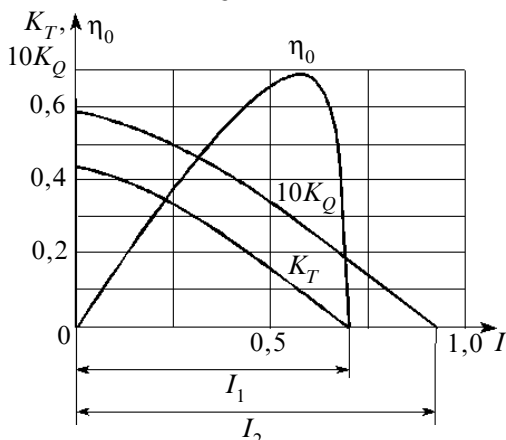


Рис. 7.2. Криві дії гребного гвинта

де ρ — щільність води.

Відносна хода визначає режим роботи гребного гвинта. Якщо судно перебуває у швартовному режимі, то $V_A = 0$, а тому й $I = 0$. У цьому випадку значення упору та моменту й, відповідно, значення їхніх коефіцієнтів K_T і K_Q виявляються максимальними. При цьому ККД гвинта дорівнює нулю, оскільки судно не рухається.

При відносних ходах гребного гвинта, що перебувають у межах $0 < I < I_1$, гвинт працює як рушій, створюючи упор за рахунок використання обертаючого моменту, що розвивається двигуном (K_T і $K_Q > 0$). При $I > I_2$ гвинт гальмує рух судна ($K_T < 0$), але, оскільки $K_Q < 0$, гвинт може віддавати деяку потужність, працюючи як водяна турбіна. Нарешті, при $I_1 < I < I_2$ гвинт, гальмуючи рух судна ($K_T < 0$), для підтримки свого обертання потребує витрат потужності ($K_Q > 0$), що повністю витрачається на подолання гідродинамічного опору. У цьому випадку гвинт не є ні рушієм, ні турбіною.

7.2. Опис експериментальної установки

У роботі використовується та ж установка, що й для вимірювання буксирувального опору і бічної сили моделі судна (див.

ЛР № 2). Відмінність полягає в тому, що до динамометра буксирного візка (рис. 7.3) кріпиться не державка моделі, а державка електропривода з гребним гвинтом фіксованого кроку. Упор гребного гвинта при заданій частоті обертання й швидкості руху буксирного візка визначається датчиком буксирного опору.

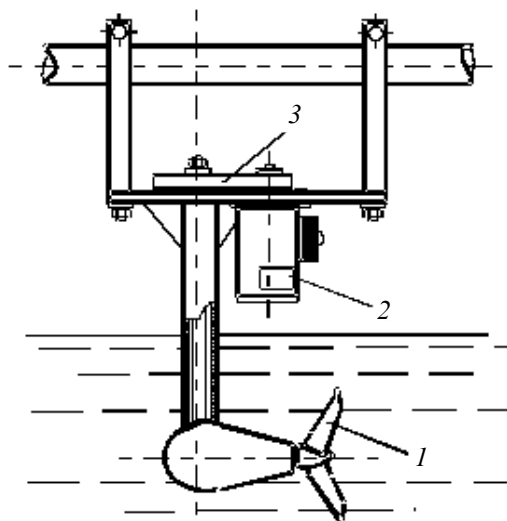


Рис. 7.3. Вузол кріплення гвинта до буксирного візка:

1 – гвинт фіксованого кроку; 2 – електродвигун;
3 – динамометр

7.3. Порядок проведення й обробка результатів експерименту

Задається частота обертання двигуна гребного гвинта n , що у процесі експерименту підтримується постійною у всіх дослідах. Від досліду до досліду змінюється тільки швидкість буксирного візка. Для швидкості буксирного візка встановлюється наступний ряд значень: $V_{A1} = 0,2$ м/с; $V_{A2} = 0,4$ м/с; $V_{A3} = 0,6$ м/с; $V_{A4} = 0,8$ м/с; $V_{A5} = 1,0$ м/с. Швидкість руху візка контролюється на пульті керування дослідного басейну. У процесі експерименту для кожного значення швидкості вимірюється відповідне значення упору T і моменту Q .

Для швидкості буксирного візка встановлюється наступний ряд значень: $V_{A1} = 0,2$ м/с; $V_{A2} = 0,4$ м/с; $V_{A3} = 0,6$ м/с; $V_{A4} = 0,8$ м/с; $V_{A5} = 1,0$ м/с. Швидкість руху візка контролюється на пульті керування дослідного басейну. У процесі експерименту для кожного значення швидкості вимірюється відповідне значення упору T і моменту Q .

За результатами експерименту будуються графіки залежності упору T , моменту Q і ККД η_0 гребного гвинта у вільній воді від поступальної швидкості його руху V_A .

Аналогічні графіки будуються в осях $K_T - I$; $K_Q - I$; $\eta_0 - I$.

Результати вимірювань і обробки експерименту оформляються у вигляді протоколу буксирних випробувань суднового гвинта (табл. 7.1–7.3).

7.4. Зміст звіту. Звіт повинен містити в собі: короткі відомості про мету й теоретичні передумови роботи; схему експериментальної установки; протокол буксирних випробувань; графіки

залежностей $T = f_1(V_A)$, $Q = f_2(V_A)$, $\eta_0 = f_3(V_A)$ і $K_T = f_4(I)$, $K_Q = f_5(I)$, $\eta_0 = f_6(I)$; висновки.

Висновки повинні містити у собі коротку оцінку характеру отриманих кривих.

7.5. Протокол буксирувальних випробувань суднового гвинта

№ _____ Дата: _____

Геометричні характеристики гвинта

$D =$ $P =$ $\theta =$

Частота обертання гвинта $n =$

Температура води в басейні $t^\circ_W =$

Таблиця 7.1. Упор гвинта

Номер буксиру- вання	Показання приладів		Розрахункові значення		$\rho n^2 D^4$	nD	$I =$ $= (4)/(7)$	$K_T =$ $= (5)/(6)$	При- мітка
	V_A , м/с	T , Н	V_A , м/с	T , Н					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблиця 7.2. Момент гвинта

Номер буксиру- вання	Показання приладів		Розрахункові значення		$\rho n^2 D^5$	nD	$I =$ $= (4)/(7)$	$K_Q =$ $= (5)/(6)$	При- мітка
	V_A , м/с	Q , Н·м	V_A , м/с	Q , Н·м					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблиця 7.3. ККД гвинта

Номер буксиру- вання	Показання приладів			Розрахункові значення		nD	$I = (2)/(7)$	$\eta_0 = (5)(8)/$ $/((6) 2\pi)$	При- мітка
	V_A , м/с	T , Н	Q , Н·м	K_T	K_Q				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Буксування провели _____

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 276 с.
 2. *Басин А.М.* Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 455 с.
 3. *Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А.* Справочник по теории корабля. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 688 с.
 4. *Гирс И.В.* Первый российский опытовый бассейн. – М.: Судостроение, 1968. – 184 с.
 5. *Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М.* Пропульсивные качества морских судов. – Л.: Судостроение, 1972. – 510 с.
 6. *Пустыльник Е.И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 357 с.
 7. *Русецкий А.А.* Оборудование и организация гидроаэродинамических лабораторий. – Л.: Судостроение, 1975. – 152 с.
-

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ РОБІТ У ДОСЛІДНОМУ БАСЕЙНІ

1. Студенти допускаються до роботи в лабораторії тільки під час занять за розкладом і у присутності керівника.

2. Допускаються до роботи лише ті студенти, які пройшли інструктаж із техніки безпеки.

3. Приступати до роботи потрібно після уважного ознайомлення із завданням і отримання відповідей на виниклі питання.

4. Під час роботи не можна відволікатися на сторонні заняття.

5. Необхідно підтримувати чистоту робочого місця.

6. При виявленні несправностей у роботі механізмів (сторонній шум, довільна зміна швидкості, пошкодження візка або моделі, відмова кінцевих вимикачів і т. д.) або наявності перешкод на шляху руху моделі негайно вимкнути установку аварійним вимикачем.

7. Категорично забороняється: включати самостійно силові й освітлювальні рубильники без дозволу керівника; порушувати роботу блокувальних пристроїв; працювати із незаземленим устаткуванням; знімати або перевстановлювати прилади, пристосування й огорожі; торкатися рухомих частин механізмів; палити і запалювати вогонь в лабораторії; знаходитися в лабораторії у верхньому одязі; працювати без інструктажу; кидати в басейн сторонні предмети.

8. Якщо відбувся нещасний випадок, необхідно: вимкнути механізми; негайно усунути потерпілого з небезпечної зони і надати йому першу допомогу; повідомити про нещасний випадок керівника робіт; до розслідування зберегти обстановку на робочому місці та стан устаткування такими, якими вони були у момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю присутніх).

СПОСІБ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Результати експериментів, що проводяться в дослідному басейні для визначення характеристик ходовості суден, містять у собі помилки, обумовлені різними причинами. Найяскравіше розбіжність значень досліджуваних характеристик виявляється при постановці т. зв. повторних (або паралельних) дослідів. Виникаючі при цьому відхилення значень даної характеристики від деякого істинного значення, що залишається невідомим, підрозділяються на два типи: систематичні та випадкові помилки.

Систематичні помилки породжуються постійно діючими причинами. Ці помилки можна вивчити і визначити кількісно. Найчастіше систематичні помилки усуваються за допомогою калібрування вимірювальних приладів. Такий спосіб компенсації систематичних помилок застосовується і в тому випадку, якщо вони викликаються зміною зовнішніх умов (істотною зміною температури і т. д.). Величина масштабного ефекту – вплив малого масштабу моделей на результати випробувань у малому дослідному басейні – визначається шляхом порівняння результатів вимірювань характеристик еталонних об'єктів (наприклад, результатів буксирувань у різних дослідних басейнах еталонної моделі – моделі одного і того ж судна).

Для виключення інструментальних помилок і чинників впливу зовнішніх умов вимірювальні прилади піддаються перевірці як перед експериментом, так і після його проведення. Чинники впливу масштабного ефекту враховуються при перерахунку результатів експерименту на натуру за допомогою введення т. зв. кореляційної надбавки.

Випадковими є ті помилки, які з'являються нерегулярно та їх неможливо передбачити наперед.

Метою експерименту, як правило, є визначення функціональної залежності типу $Y = f(X)$, де змінна X зазвичай є середнім значенням швидкості буксирування моделі на т. зв. вимірювальній ділянці – ділянці "усталеної швидкості" руху буксирувального візка. Для заданого набору середніх швидкостей руху буксирувального візка $V_1, V_2, \dots, V_n$ змінна X , значення якої визначаються

приладом вимірювання швидкості, є багатомірною випадковою величиною $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Багатомірною випадковою величиною представляється і функція $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$, значення якої визначаються іншим вимірювальним приладом. Тому функціональна залежність $y = f(x)$ установлюється за допомогою методів теорії ймовірності [6]. Серед цих методів найбільш поширеним є метод найменших квадратів, при застосуванні якого функція $f(x)$ представляється або поліномом ступеня m , або статечною функцією. Найбільш швидко визначення цієї функції може бути здійснено в середовищі *Excel* програмного продукту *Microsoft Office* з оцінкою достовірності одержуваної апроксимації за критерієм R^2 .

ЗМІСТ

ВСТУП	3
<i>Розділ 1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ</i>	<i>4</i>
1.1. Малий дослідний басейн	4
1.2. Буксирувальна система	5
1.3. Система, що вимірює й реєструє характеристики руху моделей	7
1.4. Система, що вимірює й реєструє характеристики сил, діючих на моделі	9
1.5. Проміжні й підсумкові результати експерименту, що представляються на екрані базового персонального комп'ю- тера	11
1.6. Система, що реєструє явища, супроводжуючі рух мо- делей	11
<i>Розділ 2. ОПІР ВОДИ РУХУ СУДНА</i>	<i>12</i>
<i>Лабораторна робота № 1. Визначення основних характери- стик моделі судна й вимірювальної апаратури</i>	<i>12</i>
<i>Лабораторна робота № 2. Буксирувальні випробування моделі судна на тихій воді при русі без кута дрейфу</i>	<i>16</i>
<i>Лабораторна робота № 3. Перерахування на натуру даних буксирувальних випробувань моделі судна без кута дрейфу</i>	<i>32</i>
<i>Лабораторна робота № 4. Буксирувальні випробування моделі судна на тихій воді при її русі з кутом дрейфу</i>	<i>38</i>
<i>Лабораторна робота № 5. Перерахування на натуру даних буксирувальних випробувань моделі судна з кутом дрейфу ...</i>	<i>40</i>

<i>Розділ 3. РУЛЬ СУДНА В СТАЦІОНАРНОМУ ПОТОЦІ</i>	<i>44</i>
<i>Лабораторна робота № 6. Визначення гідродинамічних ха-</i> <i>рактеристик моделі суднового руля.....</i>	<i>44</i>
<i>Розділ 4. ГРЕБНИЙ ГВИНТ У СТАЦІОНАРНОМУ ПОТОЦІ</i>	<i>49</i>
<i>Лабораторна робота № 7. Визначення гідродинамічних ха-</i> <i>рактеристик моделі гребного гвинта</i>	<i>49</i>
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	54
ДОДАТКИ.....	55
Додаток 1. Основні правила техніки безпеки при проведен-	
ні робіт у дослідному басейні	55
Додаток 2. Спосіб обробки експериментальних даних	56

Навчальне видання

**НЕКРАСОВ Валерій Олександрович
ЗАБУРДАЄВ Лев Володимирович**

**ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ДОСЛІДЖЕННЯ
ХОДОВОСТІ СУДНА НА ТИХІЙ ВОДІ**

(українською мовою)

**Редактор Т.Б. Забабуріна
Комп'ютерна правка та верстка Н.В. Ялова
Коректор М.О. Паненко**

Свідectво 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 05.11.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 3,4. Обл.-вид. арк. 3,7.
Тираж 500 прим. Вид. № 9. Зам. № 213. Ціна договірна

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