

УДК 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-7-32

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ГІДРОДИНАМІЧНИХ І КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЕРСПЕКТИВНИХ ТРАНСПОРТНИХ СУДЕН**

**О.Г. Єгоров**

к.т.н., генеральний директор Морського Інженерного Бюро

ORCID: 0000-0002-2050-8640

*e-mail: egorovag@meb.com.ua*

*ТОВ Морське Інженерне Бюро, Одеса, Україна*

**О.В. Демідюк**

к.т.н., професор кафедри суднобудування і судноремонту

ім. проф. Ю.Л. Воробйова»

ORCID: 0009-0002-1450-4077

*e-mail: alexanderdemidiuk@gmail.com*

**М.Б. Косой**

к.т.н., доц. кафедри суднобудування і судноремонту

ім. проф. Ю.Л. Воробйова»

ORCID: 0009-0008-9757-644X

*e-mail: michail@onu.edu.ua*

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Удосконалення процесу проектування суден, наявності об'єктивних даних щодо гідродинамічних та кінематичних характеристик хитавиці на хвилюванні, які не завжди можуть бути визначені розрахунковим шляхом. У дослідному басейні ОНМУ модернізована експериментальна установка для визначення гідродинамічних та кінематичних характеристик вертикальної, поперечно-горизонтальної та поздовжньої хитавиці моделей суден.

В роботі наведений детальний опис та показані схеми і загальний вигляд експериментальних установок. Проведений великий обсяг експериментальних досліджень на двох моделях перспективних суден нового покоління – суховантажного судна і танкера, проекти яких створені в Морському Інженерному Бюро. Наведені окремі результати експериментальних досліджень, які показали працездатність модернізованого вимірювального комплексу, стійкість отриманих результатів.

© Єгоров О.Г., Демідюк О.В., Косой М.Б., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

*Отримані дані можуть бути використані для верифікації чисельних розрахунків гідродинамічних та кінематичних характеристик хитавиці суден, удосконалення методик проектування суден.*

**Ключові слова:** експериментальні дослідження, гідродинамічні характеристики, кінематичні характеристики, вертикальна, поздовжня, поперечна хитавиця судна, модельні випробування, експериментальна установка.

**UDK 629.5**

**DOI 10.47049/2226-1893-2026-1-7-32**

**EXPERIMENTAL STUDIES  
OF THE HYDRODYNAMIC AND KINEMATIC CHARACTERISTICS  
OF PROMISING TRANSPORT VESSELS**

**O.G. Egorov**

Ph.D., Director general  
ORCID: 0000-0002-2050-8640  
*e-mail: egorovag@meb.com.ua*

*CJSC «Marine Engineering Bureau», Odesa, Ukraine*

**O.V. Demidiuk**

PhD, professor of the Department of Shipbuilding and Ship Repair  
named after Prof. Yu.L. Vorobyov  
ORCID: 0009-0002-1450-4077  
*e-mail: alexanderdemidiuk@gmail.com*

**M.B. Kosoy**

PhD, Associate Professor  
of the Department of Shipbuilding and Ship Repair  
named after Prof. Yu.L. Vorobyov  
ORCID: 0009-0008-9757-644X  
*e-mail: michail@onu.edu.ua*

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *Improving the ship design process requires objective data on the hydrodynamic and kinematic characteristics of motion in rough seas, which cannot always be determined through calculation. At the ONMU research basin, an experimental setup has been modernized to determine the hydrodynamic and kinematic characteristics of vertical, transverse-horizontal, and longitudinal rolling of ship models. The paper*

*provides a detailed description and shows diagrams and general views of the experimental setups. A large volume of experimental studies was conducted on two models of promising new-generation ships – a dry cargo ship and a tanker – whose designs were created at the Marine Engineering Bureau. Selected results of the experimental studies are presented, demonstrating the operational capability of the modernized measurement complex and the reliability of the obtained results. The data obtained can be used to verify numerical calculations of the hydrodynamic and kinematic characteristics of ship motion and to improve ship design methodologies.*

**Keywords:** *Experimental research, hydrodynamic characteristics, kinematic characteristics, ship motions, heave, sway, pitch, model tests, experimental equipment.*

**Вступ.** Постійний науковий пошук, у якому протягом багатьох років перебуває колектив Морського Інженерного Бюро (МІБ), спрямований на розроблення нових ефективних інженерних рішень під час проєктування річкових, змішаного річка-море плавання та морських суден різних класів і призначення. Напрямок цього пошуку формується на основі аналізу великого фактичного матеріалу, що описує з різних боків архітектурні особливості, форму корпусу та інші характеристики судна. Між МІБ та профільними кафедрами ОНМУ існує багаторічне співробітництво. Однією із головних сторін такого співробітництва є виконання в дослідному басейні ОНМУ різного роду експериментальних досліджень моделей суден, проєкти яких створені в МІБ. Аналіз матеріалів експериментальних досліджень дає змогу встановити такі особливості гідродинамічних характеристик хитавиці суден, які в низці випадків не можуть бути визначені розрахунковими методами. Сучасні теоретичні методи сьогодні не надають можливості визначення узагальнених приєднаних мас, коефіцієнтів демпфування, збурювальних сил і моментів цих суден. Певна неясність виникає і під час визначення кінематичних характеристик хитавиці, особливо її поперечних видів. Усі ці питання, безпосередньо пов'язані з ефективністю експлуатації та безпекою плавання багато-корпусних суден, сьогодні вдається розв'язувати з високим ступенем надійності лише за умови використання результатів відповідних модельних випробувань. Використання чисельних методів (CFD – методів) у зв'язку із труднощами забезпечення необхідної деталізації розрахункових сіток, обчислювальної потужності також потребує верифікації шляхом порівняння результатів розрахунків із експериментальними даними, які для специфічних суднових форм не можуть бути отримані із відкритих джерел. Тому проведення комплексних експериментальних досліджень в дослідних басейнах є **актуальною задачею**, вирішення якої сприяє підвищенню якості проєктів, шляхом прийняття обґрунтованих рішень.

**Метою дослідження** є комплексна перевірка роботи удосконаленого експериментального комплексу дослідного басейну ОНМУ щодо визначення гідродинамічних і кінематичних характеристик перспективних транспортних суден.

Крім того, розширена інформація щодо гідродинамічних та кінематичних характеристик перспективних суден в цифровому вигляді буде застосована для:

- удосконалення методик проектування транспортних суден річка-море плавання;
- отримання масивів інформації щодо верифікації в подальшому чисельних методів (CFD або аналітичних) розрахунку гідродинамічних і кінематичних характеристик руху суден;
- створення цифрових двійників (Digital Twins) для підтримки життєвого циклу проєктів, що розробляються.

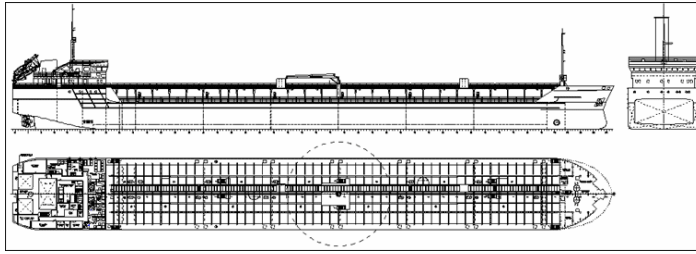
**Огляд літературних джерел.** В дослідному басейні ОНМУ вже кілька десятиліть існує експериментальний комплекс для визначення на моделях гідродинамічних і кінематичних характеристик хитавиці суден на регулярному хвилюванні [1; 2; 3]. Система вимірювань дослідного басейну ОНМУ періодично проходить модернізацію [4; 9] яка додає нові можливості існуючому експериментальному обладнанню. Були виконані важливі для планування і технічного забезпечення експериментальних випробувань дослідження з призначення характеристик хвилювання та контролю тертя в системі визначення швидкості руху моделі [6; 7]. Проводилися експериментальні випробування із оптимізації форми носової кінцівки [5], заливання судна на регулярному хвилюванні [8], дослідження динаміки перспективних суден регулярному хвилюванні [10].

**Викладення основного матеріалу.** В останні кілька років дослідний басейн переходить на нову елементну базу. Було поставлено завдання розширити технічні можливості комплексу з метою забезпечення вивчення характеристик не лише поздовжньої, а й поперечної хитавиці. Завдяки спеціальному обладнанню в басейні можна визначати коефіцієнти приєднаних мас і демпфування як добре відомим способом вільних коливань так і способом вимушених коливань моделі який реалізується спеціальною експериментальною установкою. Нові можливості комплексу продемонстровано на двох моделях суден, розроблених МІБ.

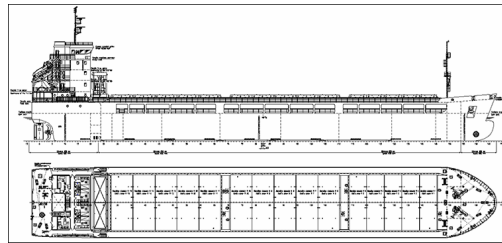
В якості об'єктів дослідження використані моделі перспективних транспортних суден – танкера змішаного плавання, та суховантажного судна. Схеми загального розташування перспективного танкера та суховантажного судна наведені на рисунку 1.

*Модель танкера.* Модель перспективного танкера виготовлена відповідно до теоретичного креслення у масштабі 1:50. Модель виготовлена за типовою для дослідного басейну ОНМУ технологією: з пінопласту і покрита сплавом парафіну з воском; для кріплення до експериментальних установок передбачені закладні деталі з дерева, які вклеєні в модель у відповідних місцях.

Програмою випробувань передбачені експерименти з моделлю за двох осадок, що відповідають посадці натурного судна в повному вантажі та в баласті.



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд перспективного танкера (а)  
та суховантажного судна (б)

Для визначення положення центра тяжіння моделі за висотою та моменту інерції мас відносно поперечної осі, що проходить через центр тяжіння моделі, виконано її динамічне тарування.

Основні характеристики судна і моделі за зазначених осадок наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики танкера і його моделі

Характеристика	Позначення	Судно (у повному вантажу)	Судно (у баласті)	Модель (у повному вантажу)	Модель (у баласті)
Довжина, м	L	132,0	—	2,640	—
Ширина, м	B	16,5	—	0,330	—
Осадка, м	d	4,3	3,6	0,086	0,072
Водозаміщення, м <sup>3</sup>	V	8621	7114	0,0689	0,0569
Площа ватерлінії, м <sup>2</sup>	S	2160	2120	0,864	0,848
Радіус інерції	$\rho/L$	—	—	0,256	0,248
Коефіцієнт загальної повноти	$C_B$	0,92	0,91	—	—

*Модель суховантажного судна.* Модель суховантажного судна виготовлена відповідно до теоретичного креслення у масштабі 1:50. Модель суховантажного судна виготовлена з пінопласту і покрита сплавом парафіну з воском; для кріплення до експериментальних установок передбачені закладні деталі з дерева, які вклеєні в модель у відповідних місцях.

Програмою випробувань передбачені експерименти з моделлю за осадки, що відповідає посадці натурального судна за повного водозаміщення. Для визначення положення центра тяжіння моделі за висотою та моменту інерції мас відносно поперечної осі, що проходить через центр тяжіння моделі, виконано її динамічне тарування.

Основні характеристики судна і моделі за зазначеної вище осадки наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні характеристики суховантажного судна і його моделі

Характеристика	Позначення	Судно (в вантажу)	Модель (в вантажу)
Довжина, м	L	105,0	2,06
Ширина, м	B	16,5	0,330
Осадка, м	d	5,5	0,11
Водозаміщення, м <sup>3</sup>	V	8766	0,0689
Площа ватерлінії, м <sup>2</sup>	S	—	—
Радіус інерції	$\rho/L$	—	0,19
Коефіцієнт загальної повноти	$C_B$	0,92	—

*Експериментальна установка для створення вимушених поздовжніх коливань моделі.* Експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик моделі — приєднаних мас і коефіцієнтів демпфування — виконуються, як правило, методом вимушених коливань на тихій воді, тоді як збурювальні сили вимірюються на регулярному хвилюванні. Незважаючи на різні методики, усі вимірювання можуть бути здійснені за допомогою одних і тих самих датчиків, що спрощує виготовлення та налагодження експериментальної установки. В дослідному басейні ОНМУ виготовлена така експериментальна установка.

На рисунку 2 наведено схему установки для створення вимушених вертикальних і кильових коливань моделі у дослідному басейні на тихій воді.

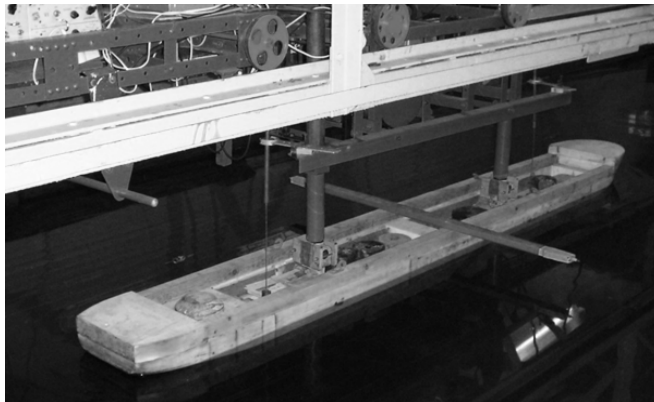
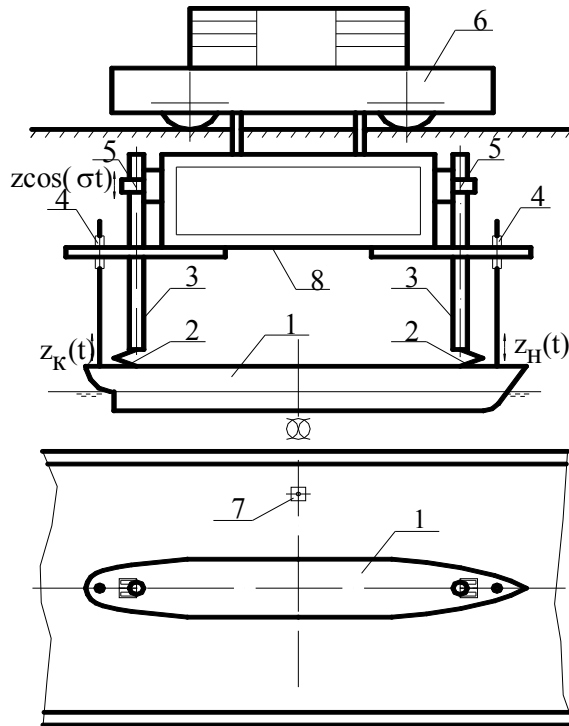


Рис. 2. Схема та загальний вигляд експериментальної установки для дослідження інерційних та демпфуючих характеристик хитавиці судна  
1 – модель; 2 – пружини; 3 – пілони; 4 – датчики переміщень; 5 – куліси;  
6 – платформа з вимірювальною апаратурою; 7 – датчик висоти хвилі;  
8 – силовий блок

Модель 1 через пілони 3 приводиться у коливальний рух від кулісного механізму, змонтованого в силовому блоці 8. Силовий блок складається з двигуна змінного струму, редуктора і кривошипно-кулісного механізму, в якому обертання електродвигуна перетворюється у зворотно-поступальний рух куліси 5 за гармонічним законом.

Між пілонами 3 і моделлю 1 встановлені пружини 2; знаючи їх жорсткість і вимірявши амплітуду вимушених коливань моделі, можна визначити узагальнену приєднану масу та коефіцієнти демпфування в рівняннях хитавиці. На візку 6 встановлені датчики переміщень, а також вимірювальна апаратура, сигнали якої кабелями подаються на реєструвальну апаратуру. Розглянемо роботу експериментальної установки на прикладі вимушених вертикальних коливань моделі. Диференціальне рівняння вимушеної вертикальної хитавиці можна подати у вигляді [5]:

$$(M + \lambda_{33})\ddot{z} + \mu_{33}\dot{z} + (\gamma S + c)z = r \cos(\sigma t), \quad (1)$$

де  $M$  і  $S$  – маса і площа ВЛ (ватерлінії) моделі відповідно;

$c$  – жорсткість пружини;

$r$  – радіус кривошипа (амплітуда верхнього кінця пружини);

$\sigma$  – частота коливань;

$\gamma$  – питома вага води;

$\lambda_{33}$  – узагальнена приєднана маса моделі;

$\mu_{33}$  – коефіцієнт демпфування моделі.

Із рівняння (1) вимушені коливання моделі визначаються у вигляді

$$z = A_z C O_s(\sigma t - \delta_z) \quad (2)$$

де  $A_z$  – амплітуда коливань моделі;

$\delta_z$  – зсув фази між процесом коливань і збурювальною силою.

Визначивши експериментально амплітуду коливань  $A_z$  і зсув фази  $\delta_z$ , можна обчислити  $\lambda_{33}$  і  $\mu_{33}$  зі співвідношень

$$\begin{aligned} \lambda_{33} &= 1 / \sigma^{2\uparrow} (\gamma S + c - (cr / A_{\downarrow z} \cos(\delta_{\downarrow z})) - M, \\ \mu_{33} &= \frac{cr}{A_z \sigma} \sin(\delta_z) \end{aligned} \quad (3)$$

Блок-схема вимірювання амплітуд вимушених коливань моделі наведена на рисунку 3, а загальний вигляд установки на рисунку 2.

При вимірюванні амплітуд вимушених коливань на тихій воді модель 1 через пружини 2 приводиться в рух від куліс 3 за гармонійним законом  $r \cos \sigma t$  (верхній кінець пружин), амплітуда коливань моделі (нижній кінець пружин) вимірюється датчиками переміщень 4. Сигнали від датчиків  $z_K(t)$  і  $z_H(t)$ , пропорційні переміщенням моделі в точках кріплення датчиків, подаються на тензопідсилювач (ТП) і далі через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) записуються у файл на персональному комп'ютері (ПК). Одночасно в той же файл записується сигнал від спеціального перемикача 5, пов'язаного з кулісою, фіксує проходження через «0» кулісного механізму.

У файлі результатів у ПЕОМ числа, пропорційні  $z_H(t)$  і  $z_K(t)$ , записуються послідовно, однак швидкість перетворення настільки велика, що їх можна вважати записаними одночасно. Таким чином, після кожного прогону моделі можна визначити амплітуду коливань моделі  $A_z = \max \{[z_H(t)+z_K(t)]/2\}$  і фазу  $\delta_z$ .

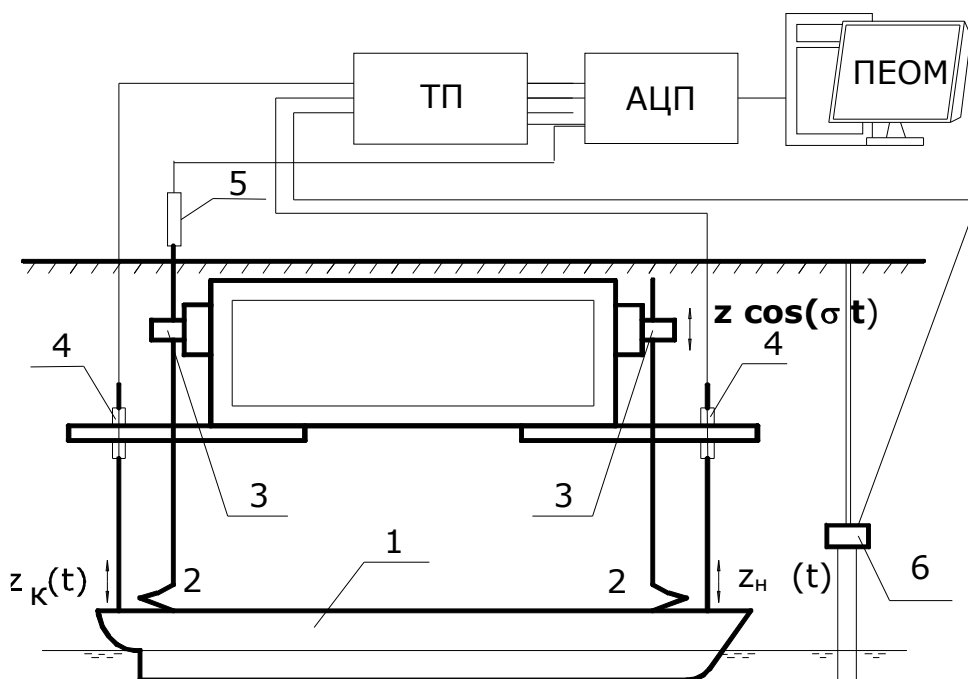


Рис. 3. Блок-схема вимірювального комплексу

для визначення амплітуд вимушених коливань моделі:

1 – модель; 2 – пружини; 3 – куліси; 4 – датчики переміщень; 5 – датчик нульового положення кулісного механізму; 6 – датчики хвильового профілю

Для визначення приєднаного моменту інерції та коефіцієнта демпфування під час кильових коливань необхідно один із кривошипів кривошипно-кулісного механізму повернути на  $180^\circ$ , врахувати величини відповідних констант для кильової хитавиці, а вся вимірювальна частина залишається без змін. Частота вимушених коливань задається частотою обертання приводного двигуна.

Збурювальні сили, спричинені регулярним хвилюванням, вимірюються на тій самій експериментальній установці при загальмованому приводному двигуні. Встановлюються датчики хвилі 7 (рис. 2) і 6 (рис. 3) для вимірювання параметрів хвилювання; замість пружин 2 (рис. 2 і 3) на ті самі місця встановлюються датчики динамометрів для вимірювання збурювальних сил  $F_H(t)$  і  $F_K(t)$ .

Використовуючи записані у файл миттєві значення  $F_H(t)$  і  $F_K(t)$ , можна отримати амплітуди вертикальної збурювальної сили  $F_Z = \max \left[ \frac{F_H(t) + F_K(t)}{2} \right]$  і амплітуди збурювального моменту  $M_y \sim \max [(F_H(t) - F_K(t))]$  а також їх фази відносно хвилювання.

Оскільки експериментальна установка змонтована на візку, випробування можна проводити як на стоянці, так і за різних швидкостей ходу моделі.

Кінематичні характеристики поздовжньої хитавиці моделі на регулярному хвилюванні являють собою графіки залежності відносних амплітуд вертикальної та кильової хитавиці відносно хвиль за тих самих частот регулярного хвилювання. Параметром цих графіків є швидкість ходу моделі.

Загальний вигляд експериментальної установки для вимірювання характеристик поздовжньої хитавиці моделі та її схема наведені на рисунку 4.

Модель 1 встановлена в ромбі буксирувальної системи 6 таким чином, що має можливість здійснювати вертикальні та кильові коливання.

На візку 2 встановлені датчики переміщень 3, вимірювальна апаратура 4 і датчик хвилі 5, який розташовується в площині мідель-шпангоута моделі.

Експериментальна установка для вимірювання кінематичних характеристик є спрощеною експериментальною установкою для визначення приєднаних мас і коефіцієнтів демпфування (немає розгойдувального пристрою), а вимірювальна частина залишається тією самою.

Із записаних у файл миттєвих значень  $Z_H(t)$ ,  $Z_K(t)$  і  $h_B(t)$  можна отримати амплітуди вертикальної хитавиці  $A_Z \sim \max \left[ \frac{Z_H(t) + Z_K(t)}{2} \right]$  амплітуди кильової хитавиці  $A_v \sim \max \left[ \frac{Z_H(t) - Z_K(t)}{L} \right]$  а також їх фази відносно  $\max h_B(t)$  для кожного прогону моделі.

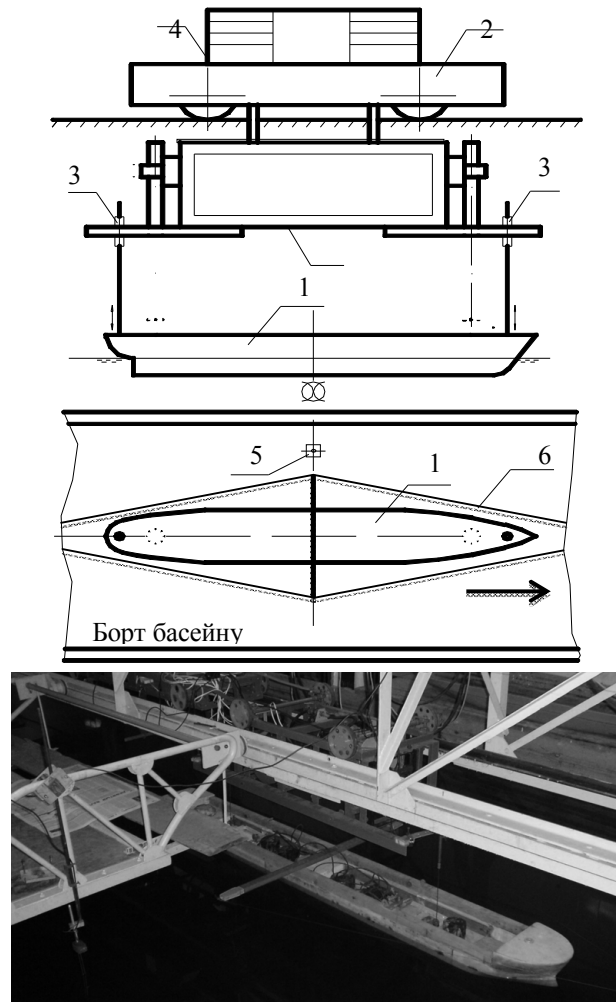


Рис. 4. Схема та загальний вигляд установки для вимірювання кінематичних характеристик хитавиці моделі

1 – модель; 2 – візок; 3 – датчики переміщень; 4 – вимірювальна апаратура;  
5 – датчик хвильового профілю; 6 – ромб буксирувальної системи

Для стандартної моделі довжиною 2 м (ця довжина є оптимальною для дослідного басейна ОНМУ) обладнання дослідного басейна дозволяє виконувати випробування з визначення гідродинамічних характеристик хитавиці моделей на частотах, що відповідають відносним довжинам хвиль  $\lambda/L$  від 0,5 до 2,0 за відносних швидкостей ходу моделі від  $Fr = 0$  до  $Fr = 0,3$ .

Експериментальна установка для визначення гідродинамічних характеристик вимушених поперечно-горизонтальних коливань і рискання моделі. На рисунку 5 наведено схему та загальний вигляд установки для створення вимушених поперечно-горизонтальних коливань і рискання моделі у дослідному басейні на тихій воді.

Моделю 1 через пілони 3 приводиться у коливальний рух від кулісного механізму, змонтованого в силовому блоці 8. Силовий блок складається з двигуна змінного струму, редуктора і кривошипно-кулісного механізму, в якому обертання електродвигуна перетворюється у зворотно-поступальний рух куліси 5 за гармонічним законом.

Між пілонами 3 і моделлю 1 встановлені пружини 2; знаючи жорсткість яких і вимірявши амплітуду вимушених коливань моделі, можна визначити узагальнену приєднану масу та коефіцієнти демпфування в рівняннях хитавиці. На візку 6 встановлені датчики переміщень, а також вимірювальна апаратура, сигнали якої кабелями подаються на реєструвальну апаратуру.

Моделю 1 через пілони 3 приводиться у коливальний рух від кулісного механізму, змонтованого в силовому блоці 8. Силовий блок складається з двигуна змінного струму, редуктора і кривошипно-кулісного механізму, в якому обертання електродвигуна перетворюється у зворотно-поступальний рух куліси 5 за гармонічним законом. Між пілонами 3 і моделлю 1 встановлені пружини 2; знаючи жорсткість яких і вимірявши амплітуду вимушених коливань моделі, можна визначити узагальнену приєднану масу та коефіцієнти демпфування в рівняннях хитавиці. На візку 6 встановлені датчики переміщень, а також вимірювальна апаратура, сигнали якої кабелями подаються на реєструвальну апаратуру.

Розглянемо роботу експериментальної установки на прикладі поперечно-горизонтальних вимушених коливань моделі. Диференціальне рівняння вимушених поперечно-горизонтальних коливань можна подати у вигляді

$$(M + \lambda_{22})\ddot{y} + \mu_{22}\dot{y} + cy = r \cdot \cos(\sigma t), \quad (4)$$

де  $M$  – маса моделі;

$c$  – жорсткість пружини;

$r$  – радіус кривошипа (амплітуда верхнього кінця пружини);

$\sigma$  – частота коливань;

$\gamma$  – питома вага води;

$\lambda_{22}$  – узагальнена приєднана маса моделі;

$\mu_{22}$  – коефіцієнт демпфування моделі.

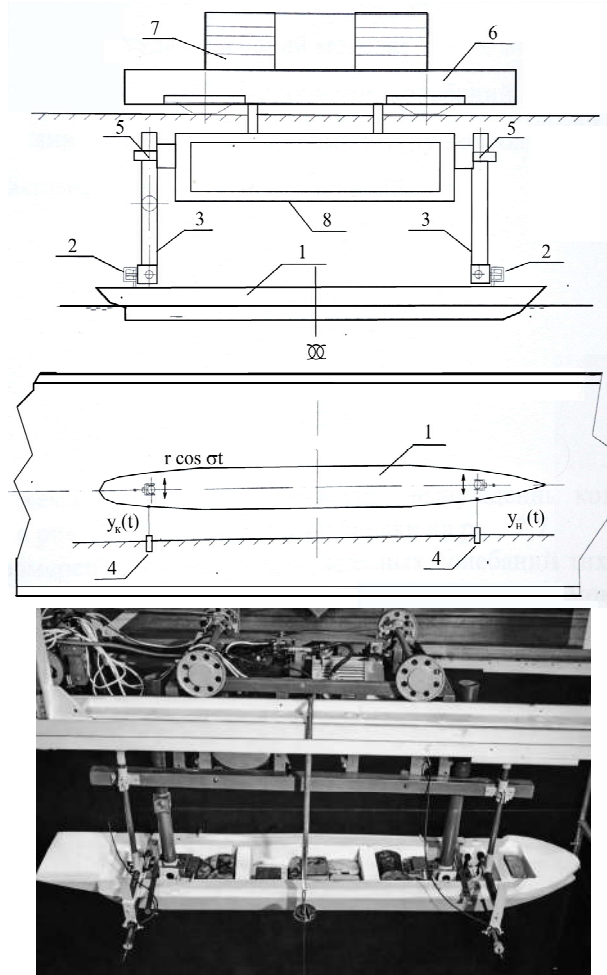


Рис. 5. Схема та загальний вигляд установки для створення вимушених поперечно-горизонтальних коливань моделі  
1 – модель; 2 – пружини; 3 – пілони; 4 – давачі переміщень; 5 – куліси; 6 – візок;  
7 – вимірвальна апаратура; 8 – силовий блок

Із рівняння (4) вимушені коливання моделі визначаються у вигляді

$$y = A_y \cdot \cos(\sigma t - \delta_y) \quad (5)$$

де  $A_y$  – амплітуда коливань моделі;

$\delta_y$  – зсув фази між процесом коливань і збурювальною силою.

Визначивши експериментально амплітуду коливань  $A_y$  і зсув фази  $\delta_y$ , можна обчислити  $\lambda_{22}$  і  $\mu_{22}$  зі співвідношень

$$\lambda_{22} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \left( c - \left( c \cdot \frac{r}{A_y} \right) \cdot \cos \delta_y \right) - M, \quad (6)$$

$$\mu_{22} = \frac{c \cdot r}{A_y \cdot \sigma} \cdot \sin \delta_y$$

Під час вимірювання амплітуд вимушених коливань на тихій воді модель 1 через пружини 2 приводиться в рух від куліси 3 за гармонічним законом  $r \cdot \cos(\sigma t)$  (верхній кінець пружини), амплітуда коливань моделі (нижній кінець пружини, пов'язаний з моделлю) вимірюється датчиками переміщень 4. Сигнали від датчиків  $y_n(t)$ ,  $y_k(t)$ , пропорційні переміщенням моделі в точках кріплення датчиків, подаються на тензопідсилювач (ТП) і далі через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) записуються у файл ПЕОМ. Одночасно в цей самий файл записується сигнал від спеціального перемикача 5, пов'язаного з кулісою, який фіксує проходження через «0» кулісного механізму. У файлі результатів у ПЕОМ числа, пропорційні  $y_n(t)$  і  $y_k(t)$ , записуються послідовно, однак швидкість перетворення настільки велика, що їх можна вважати записаними одночасно. Таким чином, після кожного прогону моделі можна визначити амплітуду коливань моделі

$$A_y = \max \left[ \frac{y_n(t) + y_k(t)}{2} \right] \text{ і фазу } \delta_y.$$

Для визначення приєданого моменту інерції та коефіцієнта демпфування моделі під час рискання необхідно один із кривошипів кривошипно-кулісного механізму повернути на  $180^\circ$ , врахувати величини відповідних констант для рискання, а вся вимірювальна частина залишається без змін. Частота вимушених коливань задається частотою обертання приводного двигуна.

*Результати експериментальних досліджень.* Усі експерименти, результати яких наведені в цій роботі, виконані за нульової швидкості моделей ( $v_M = 0$ ).

Діапазон відносних частот  $\nu$  при вимушених коливаннях на тихій воді, а також при вимірюванні збурювальних сил, поперечно-горизонтальної та поздовжньої хитавиці на регулярному хвилюванні було обрано в межах  $\nu$  від 0 до 6,0,

$$\nu = \sigma \sqrt{\frac{L}{g}},$$

де  $\sigma$  – частота вимушених коливань або регулярного хвилювання, рад/с;

$L$  – довжина моделі, м;

$g$  – прискорення сили тяжіння, 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Гідродинамічні характеристики моделі суховантажного судна при вимушених вертикальних коливаннях подані у вигляді залежностей безрозмірних приєднаних мас  $\bar{\lambda}_{33} = f(v)$  (рис. 6.) і коефіцієнтів демпфування  $\bar{\mu}_{33} = f(v)$  (рис. 7.)

$$\bar{\lambda}_{33} = \frac{\lambda_{33}}{\rho V}; \quad \bar{\mu}_{33} = \frac{\mu_{33}}{\rho V \sqrt{\frac{g}{L}}},$$

де  $V$  – об'ємна водотоннажність моделі, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – густина води, кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;

$\lambda_{33}$  – приєднана маса моделі при вертикальних коливаннях, кгс·с<sup>2</sup>/м;

$\mu_{33}$  – коефіцієнт демпфування при вертикальних коливаннях, кгс·с/м.

Гідродинамічні характеристики моделі суховантажного судна при вимушених кілевих коливаннях подані у вигляді залежностей безрозмірних приєднаних моментів інерції мас  $\bar{\lambda}_{55} = f(v)$  (рис. 8.) і коефіцієнтів демпфування  $\bar{\mu}_{55} = f(v)$  (рис. 9)

$$\bar{\lambda}_{55} = \frac{\lambda_{55}}{\rho V L^2}; \quad \bar{\mu}_{55} = \frac{\mu_{55}}{\rho V L^2 \sqrt{\frac{g}{L}}},$$

де  $\lambda_{55}$  – приєднаний момент інерції маси моделі при кілевих коливаннях, кгс·с<sup>2</sup>·м;

$\mu_{55}$  – коефіцієнт демпфування при кілевих коливаннях, кгс·с·м.

Гідродинамічні характеристики моделі танкера при вимушених поперечно-горизонтальних коливаннях подані у вигляді залежностей безрозмірних приєднаних мас  $\bar{\lambda}_{22} = f(v)$  (рис. 10.) і коефіцієнтів демпфування  $\mu_{22} = f(v)$  (рис. 11.):

$$\bar{\lambda}_{22} = \frac{\lambda_{22}}{\rho V \sqrt{\frac{g}{L}}}; \quad \bar{\mu}_{22} = \frac{\mu_{22}}{\rho V \sqrt{\frac{g}{L}}},$$

де  $V$  – об'ємна водотоннажність моделі, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – густина води, кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;

$\lambda_{22}$  – приєднаний момент інерції маси моделі при поперечно-горизонтальних коливаннях, кгс·с<sup>2</sup>/м;

$\mu_{22}$  – коефіцієнт демпфування при поперечно-горизонтальних коливаннях, кгс·с/м.

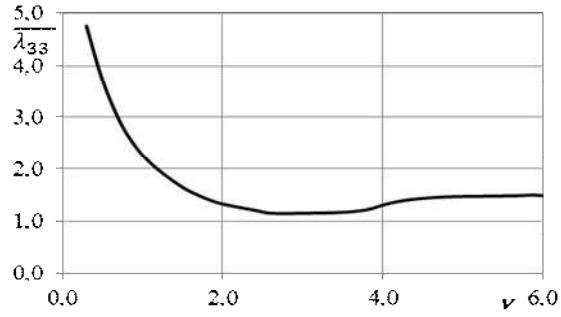


Рис. 6. Приєднана маса при вертикальних коливаннях

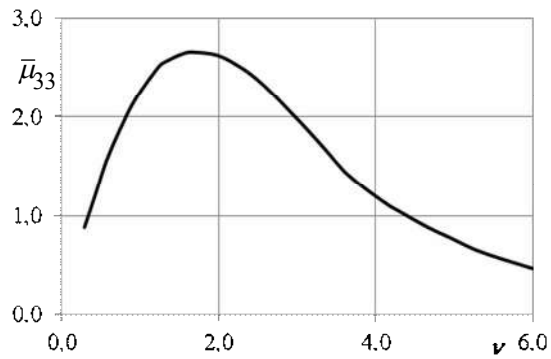


Рис. 7. Коефіцієнт демпфування при вертикальних коливаннях

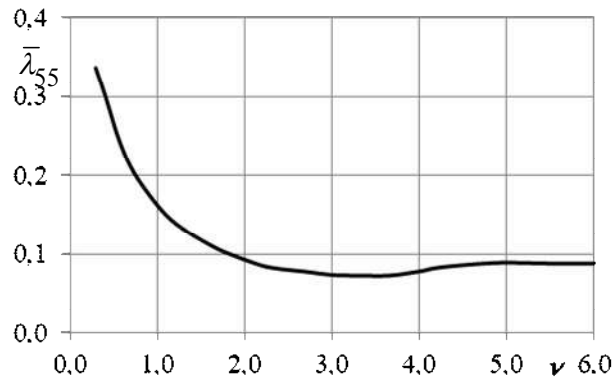


Рис. 8. Приєднаний момент інерції маси при килевих коливаннях

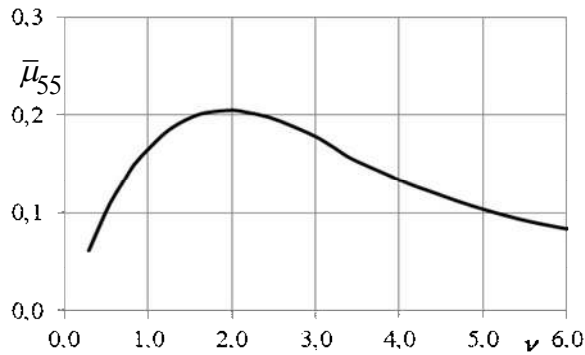


Рис. 9. Коефіцієнт демпфування при кілевих коливаннях

Гідродинамічні характеристики моделі танкера при ризканні подані у вигляді залежностей безрозмірних приєднаних моментів інерції мас  $\bar{\lambda}_{66} = f(\nu)$  (рис. 12.) і коефіцієнтів демпфування  $\bar{\mu}_{66} = f(\nu)$  (рис. 13.)

$$\bar{\lambda}_{66} = \frac{\lambda_{66}}{\rho V L^2}; \quad \bar{\mu}_{66} = \frac{\mu_{66}}{\rho V L^2 \sqrt{\frac{g}{L}}},$$

де  $\nu$  – об’ємна водотоннажність моделі, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – густина води, кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;

$\lambda_{66}$  – приєднаний момент інерції маси моделі при ризканні, кгс·с<sup>2</sup>/м;

$\mu_{66}$  – коефіцієнт демпфування при ризканні, кгс·с/м.

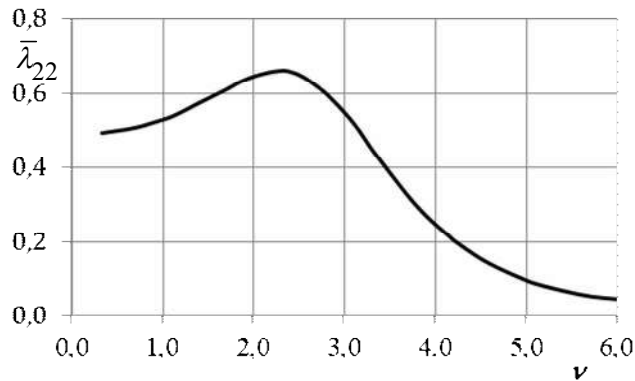


Рис. 10. Приєднана маса при поперечно-горизонтальних коливаннях

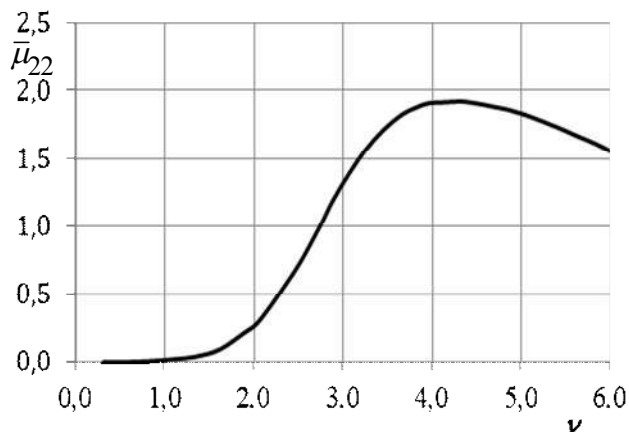


Рис. 11. Коефіцієнт демпфування при поперечно-горизонтальних коливаннях

Збурюючі сили і моменти на регулярному хвилюванні представлені у вигляді залежностей безрозмірних амплітуд вертикальних сил  $\bar{F}_z = f(\nu)$  (рисунки 14, 15) і поздовжнього моменту  $\bar{M}_y = f(\nu)$  (рисунки 16, 17) для моделі суховантажного судна, а також поперечно-горизонтальних сил  $\bar{F}_y = f(\nu)$  (рисунки 18, 19) і моменту рискання  $\bar{M}_z = f(\nu)$  (рисунки 20, 21) для моделі танкера при значеннях курсових кутів від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ :

$$\bar{F}_z = \frac{F_z}{\gamma \cdot r_0 \cdot S}; \quad \bar{F}_y = \frac{F_y}{\gamma \cdot r_0 \cdot S}; \quad \bar{M}_y = \frac{M_y}{\gamma \cdot r_0 \cdot S \cdot L}; \quad \bar{M}_z = \frac{M_z}{\gamma \cdot r_0 \cdot S \cdot L}$$

де  $F_z$  – амплітуда вертикальної збурюючої сили, кгс;

$F_y$  – амплітуда поперечно-горизонтальної збурюючої сили, кгс;

$M_y$  – амплітуда поздовжнього моменту, кгс·м;

$M_z$  – амплітуда моменту рискання, кгс·м;

$r_0$  – радіус хвилі, м;

$S$  – площа ватерлінії моделі, м<sup>2</sup>.

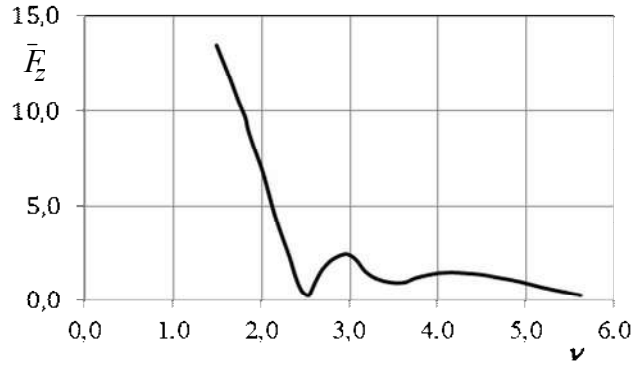


Рис. 14. Вертикальна збурююча сила,  $\psi=0^\circ$

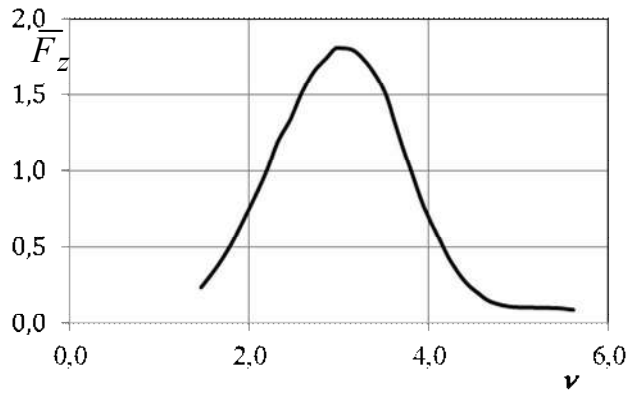


Рис. 15. Вертикальна збурююча сила,  $\psi = 60^\circ$

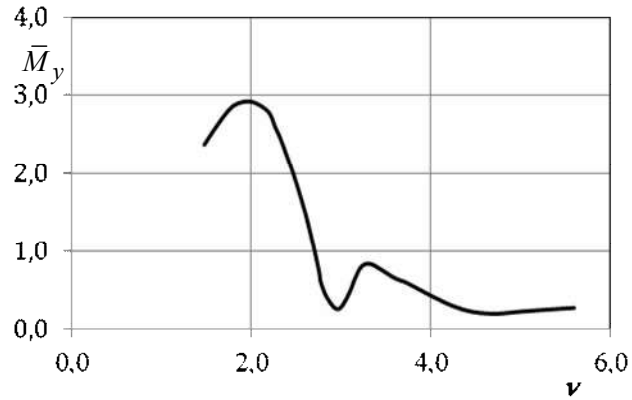


Рис. 16. Поздовжній момент,  $\psi=0^\circ$

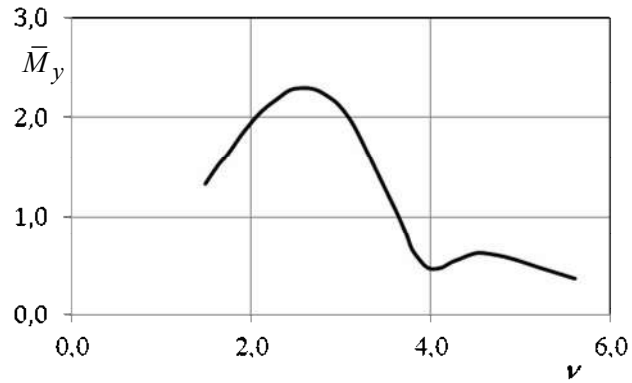


Рис. 17. Поздовжній момент,  $\psi = 60^\circ$

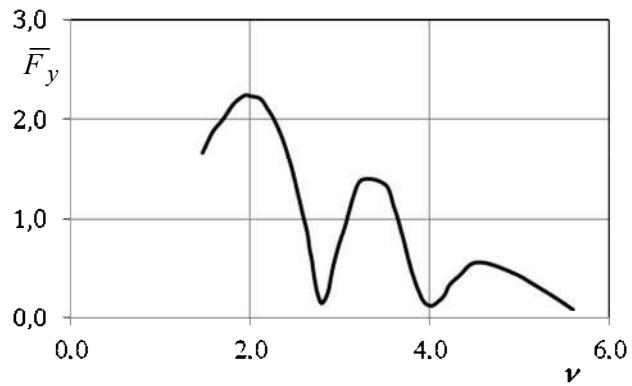


Рис. 18. Поперечно-горизонтальна збурююча сила,  $\psi = 30^\circ$

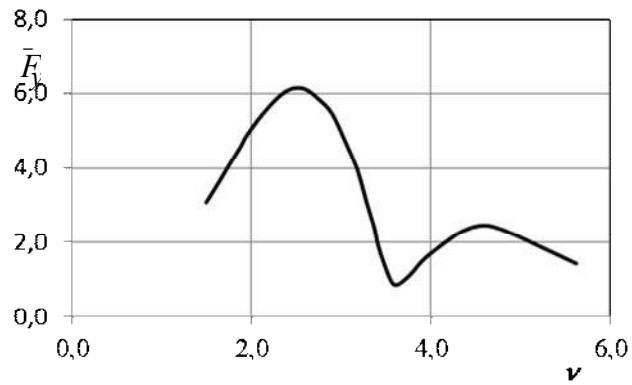


Рис. 19. Поперечно-горизонтальна збурююча сила,  $\psi = 120^\circ$

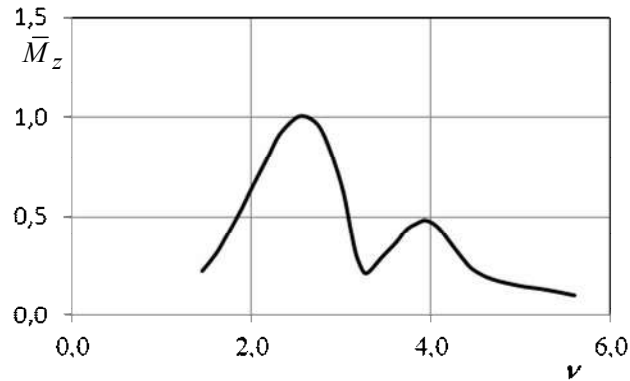


Рис. 20. Момент ризкання,  $\psi = 30^\circ$

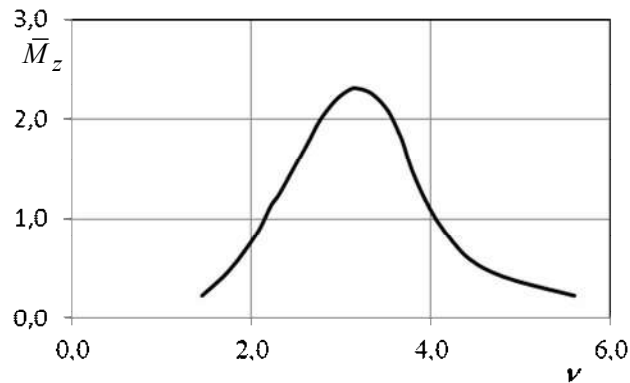


Рис. 21. Момент ризкання,  $\psi = 120^\circ$

Поздовжня хитавиця моделі суховантажного судна на регулярному хвилюванні представлена у вигляді залежностей безрозмірних амплітуди вертикальної хитавиці  $\bar{\zeta} = f(\nu)$  (рисунки 22, 24) і амплітуди кілевої хитавиці  $\bar{\psi} = f(\nu)$  (рисунки 23, 25) від безрозмірної частоти коливань  $\nu$

$$\bar{\zeta} = \frac{\zeta}{r_0}; \quad \bar{\psi} = \frac{\psi}{\alpha_0},$$

де  $\zeta$  – амплітуда вертикальної хитавиці, м;  
 $\psi$  – амплітуда кілевої хитавиці, рад;  
 $\alpha_0$  – максимальний кут хвильового схилу, рад.

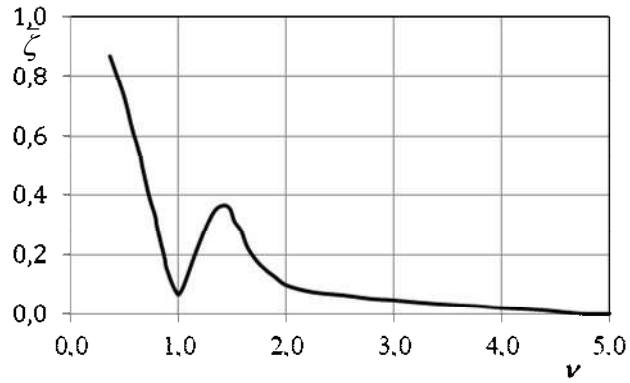


Рис. 22. Амплітуда вертикальної хитавиці,  $\psi=0^\circ$

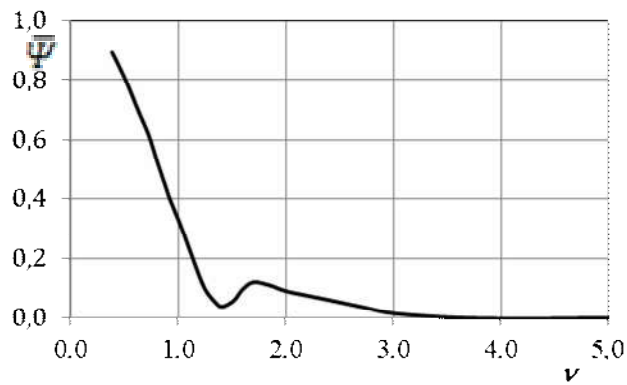


Рис. 23. Амплітуда кілевої хитавиці,  $\psi=0^\circ$

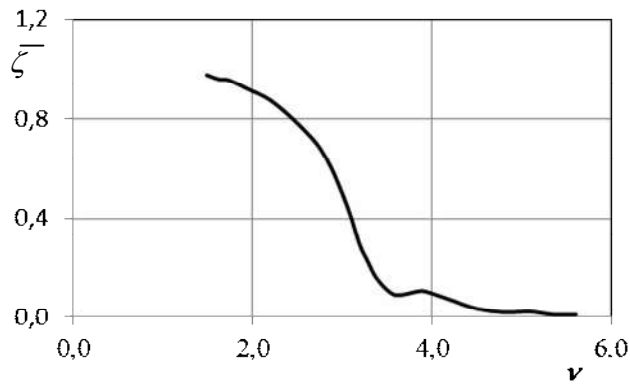


Рис. 24. Амплітуда вертикальної хитавиці,  $\psi = 120^\circ$

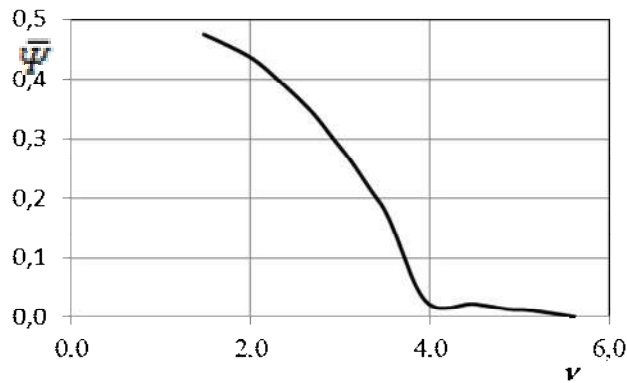


Рис. 25. Амплітуда кілевої хитавиці,  $\psi = 120^\circ$

### Висновки

У дослідному басейні ОНМУ за результатами досліджень:

- створені моделі перспективних суден, проекти яких розроблені Морським Інженерним Бюро – танкера і суховантажного судна.

- удосконалена експериментальна установка, налаштування якої дозволяють виконувати дослідне визначення гідродинамічних та кінематичних характеристик руху судна;

- удосконалена методика визначення в процесі вимушених коливань моделі її гідродинамічних характеристик, в тому числі коефіцієнтів зв'язку; приєднаних мас та коефіцієнтів депфування при поперечних коливаннях;

- отримані можливості визначення збурюючих сил і моментів при поперечних видах хитавиці моделі.

Проведені комплексні дослідження динаміки перспективних суден. Отримані дані свідчать про:

- працездатність існуючого обладнання, як механічної так і електронної компонент установки;

- стабільність отриманих результатів:

Отримані результати експериментальних випробувань можуть бути використані для верифікації:

- чисельних розрахунків ГДХ і КХ руху суден за CFD методами;

- алгоритмів аналітичного визначення ГДХ і КХ руху суден, в тому числі для створення інженерних методик розрахунку хитавиці судна.

- розробки/уточнення методик проектування суден річка-море плавання з урахуванням динаміки руху на хвилюванні.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воробйов Ю.Л. Асимптотична теорія хитавиці судна: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.08.01. – Одеса, 1982. – 380 с.
2. Демідюк О.В., & Тонюк В.І. (2007). Експериментальне визначення гідродинамічних та кінематичних характеристик поздовжньої хитавиці тримарана. Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, (23), С. 81-88.
3. Воробйов Ю.Л., Демідюк О.В., & Романадзе Д.Д. (2009). Визначення гідродинамічних та кінематичних характеристик поздовжньо-горизонтальних коливань судна, пришвартованого до точкового причалу. Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, (26), С. 28-43.
4. Демідюк О.В. (2012). Модернізація системи вимірювань дослідного басейну ОНМУ. Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, Вип, 34, С. 67-76.
5. Давидов І.П., Демідюк О.В., Печенюк А.В., (2015). Експериментальне дослідження вдосконалених обводів тихохідного судна великої повноти, Shipbuilding and Marine Infrastructure, № 2 (4), С. 144-150.
6. Демідюк О.В., Єфремова, Н.В., Чернецький, О.В. (2015). Про визначення характеристик хвилювання під час планування експериментів у дослідному басейні ОНМУ. Вісник ОНМУ.– Одеса: ОНМУ, Вип. 3 (34), С. 145-156.
7. Demidiuk A.V., Kosoy M.B. (2015). Evaluation method of friction of gravitational type towing tank towing system. Herald of ONMU. Vol. 3, (34). P. 117-129.
8. Єгоров Г.В., Демідюк О.В., Тонюк В.І. (2017). Експериментальне дослідження заливання кранового судна з трюмом, що не оснащений люковими закриттями. Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, Вип. 4 (53), С. 25-39.
9. Демідюк О.В., Заєць А.Ю., Котовська Н.Н., Онищенко А.Ф., Войнович М.В. (2023). Модернізація дослідного басейну ОНМУ для дослідження ходових якостей швидкісних суден. Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, Вип. 1 (68), С. 66-79. URL: <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/140>. <http://rp.onmu.org.ua/handle/123456789/3105>.
10. Єгоров О.Г., Демідюк О.В., Котовська Н.Н. (2023). Фізичне моделювання ходових якостей пасажирського судна нового покоління. Вісник ОНМУ. Одеса: ОНМУ, Вип. 3 (69), С. 7-23. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-2-7-23>. URL: <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/152>.

## REFERENCE

1. Vorobiov, Y.L. (1982). Asymptotychna teoriia khytavytsi sudna [Asymptotic theory of ship rolling] (Doctoral dissertation, Odesa). 380 p.
2. Demidiuk, O.V., & Toniuk, V.I. (2007). Eksperymentalne vyznachennia hidrodynamichnykh ta kinematychnykh kharakterystyk pozdovzhnoi khytavytsi trymarana [Experimental determination of hydrodynamic and kinematic characteristics of trimaran longitudinal motions]. *Visnyk ONMU*, (23), P. 81-88.
3. Vorobiov, Y.L., Demidiuk, O.V., & Romanadze, D.D. (2009). Vyznachennia hidrodynamichnykh ta kinematychnykh kharakterystyk pozdovzhno-horyzontalnykh kolyvan sudna, pryshvartovanoho do tochkovoho pryhalu [Determination of hydrodynamic and kinematic characteristics of longitudinal-horizontal oscillations of a ship moored to a point berth]. *Visnyk ONMU*, (26), P. 28-43.
4. Demidiuk, O.V. (2012). Modernizatsiia systemy vymiriuvan doslidnoho baseinu ONMU [Modernization of the measurement system of the ONMU towing tank]. *Visnyk ONMU*, (34), P. 67-76.
5. Davydov, I.P., Demidiuk, O.V., & Pecheniuk, A.V. (2015). Eksperymentalne doslidzhennia vdoskonalenykh obvodiv tykhohidnoho sudna velykoi povnoty [Experimental study of improved hull forms of a low-speed full-form ship]. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, (2)(4), P. 144-150.
6. Demidiuk, O.V., Yefremova, N.V., & Chernetskyi, O.V. (2015). Pro vyznachennia kharakterystyk khvyliuvannia pid chas planuvannia eksperymentiv u doslidnomu baseini ONMU [On determining wave characteristics when planning experiments in the ONMU towing tank]. *Visnyk ONMU*, (3)(34), P. 145-156.
7. Demidiuk, A.V., & Kosoy, M.B. (2015). Evaluation method of friction of gravitational type towing tank towing system. *Herald of ONMU*, 3(34), P. 117-129.
8. Egorov, G.V., Demidiuk, O.V., & Toniuk, V.I. (2017). Eksperymentalne doslidzhennia zalyvannia kranovoho sudna z triiumom, shcho ne osnashchenyi liukovymy zakryttiamy [Experimental study of flooding of a crane vessel with a hold not equipped with hatch covers]. *Visnyk ONMU*, (4)(53), P. 25-39.

9. Demidiuk, O.V., Zaiets, A.Yu., Kotovska, N.N., Onyshchenko, A.F., & Voinovych, M.V. (2023). Modernizatsiia doslidnoho baseinu ONMU dlia doslidzhennia khodovykh yakostei shvydkisnykh suden [Modernization of the ONMU towing tank for studying the seakeeping of high-speed vessels]. Visnyk ONMU, (1)(68), P. 66-79. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-1-66-79>.
10. Egorov, O.G., Demidiuk, O.V., & Kotovska, N.N. (2023). Fizychni modeliuvannia khodovykh yakostei pasazhyrskoho sudna novoho pokolinnia [Physical modeling of seakeeping qualities of a new-generation passenger ship]. Visnyk ONMU, (3)(69), P. 7-23. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-2-7-23>.

*Дата надходження статті: 02.01.2026*

*Дата прийняття статті: 30.01.2026*

*Дата публікації статті: 02.04.2026*