

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.5:504.5:51

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.02>

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВЕЛИКОТОННАЖНОГО БАЛКЕРА, ПРИШВАРТОВАНОГО ДО ПРИЧАЛУ, ПІД ДІЄЮ РЕГУЛЯРНИХ ХВИЛЬ

Н.І. Александровська<sup>1</sup>, М.Б. Косой<sup>2</sup>, О.В. Демідюк<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри «Суднобудування та судноремонту ім. Ю.Л. Воробйова»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

<sup>2</sup>к.т.н., доцент кафедри «Суднобудування та судноремонту ім. Ю.Л. Воробйова»  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0008-9757-644X

<sup>3</sup>к.т.н., доцент, професор кафедри «Суднобудування та судноремонту  
ім. Ю.Л. Воробйова»  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна  
ORCID ID: 0009-0002-1450-4077

#### Анотація

**Вступ.** Сучасний розвиток портової інфраструктури супроводжується будівництвом причальних споруд у недостатньо захищених акваторіях. За таких умов хвильове збурення може спричинити значні переміщення пришвартованих суден, що ускладнює вантажні операції та підвищує ризик пошкодження судна і причалу. Особливо небезпечними є регулярні хвилі, які можуть викликати резонансні коливання. Тому актуальним є експериментальне дослідження динаміки великотоннажних суден у реальних умовах експлуатації. **Мета.** Метою роботи є експериментальне визначення характеристик поступальних і кутових переміщень великотоннажного балкера, пришвартованого до причалу, під дією регулярного хвилювання в умовах мілководдя. Додатковою метою є верифікація аналітичної моделі руху судна та оцінка можливості застосування спрощених інженерних критеріїв для перевірки допустимості виконання вантажних операцій. **Результати.** Дослідження виконано в дослідному басейні з використанням фізичної моделі, побудованої за критерієм подібності Фруда. Розглянуто два стани навантаження – у повному вантажу та з 50 % вантажу та повними запасами для обох випадків. Для вимірювання рухів застосовано акселерометри та інклінометри. Обробку експериментальних даних проведено методом швидкого перетворення Фур'є. Встановлено, що при частковому завантаженні амплітуди вертикальних і повздовжніх коливань зростають, а періоди руху збільшуються. При повному завантаженні коливання зменшуються за рахунок більшої інерції судна. Поперечні та курсові переміщення залишаються незначними. Отримано задовільну узгодженість між експериментальними та розрахунковими даними. **Висновки.** У результаті дослідження підтверджено

суттєвий вплив умов завантаження на динаміку пришвартованого судна. Показано, що фізичне моделювання є ефективним засобом оцінки безпеки стоянки суден у складних гідрометеорологічних умовах. Запропонований підхід дозволяє обґрунтувати режими експлуатації причалів і вибір схем швартування без виконання складних чисельних розрахунків. Отримані результати можуть бути використані в практиці проектування та експлуатації портів споруд.

**Ключові слова:** пришвартоване судно; динаміка судна; регулярне хвилювання; фізичне моделювання; експериментальні дослідження; амплітуди коливань; швартовна система; причальні відбійники; гідрометеорологічні умови; безпека портів операцій.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMICS OF A LARGE-TONNAGE BULK CARRIER MOORED AT A BERTH UNDER THE ACTION OF REGULAR WAVES

N.I. Aleksandrovska<sup>1</sup>, M.B. Kosoy<sup>2</sup>, O.V. Demidiuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0008-9757-644X

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Professor of the Department “Shipbuilding and Ship Repair named after Yu.L. Vorobyov”,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID ID: 0009-0002-1450-4077

### Summary

**Introduction.** The development of modern port infrastructure increasingly involves the construction of berthing facilities in insufficiently protected water areas. Under such conditions, wave-induced motions of moored vessels may significantly affect the safety and efficiency of cargo-handling operations and increase the risk of damage to both ships and quay structures. Regular waves are of particular concern, as they can cause pronounced oscillatory responses and resonance effects, especially in shallow water conditions. Therefore, experimental investigation of moored ship dynamics remains an important engineering task. **Purpose.** The purpose of this study is the experimental determination of linear and angular motion characteristics of a large-tonnage bulk carrier moored at a quay under regular wave action in shallow water. An additional objective is the validation of an analytical ship motion model and the assessment of simplified engineering criteria for evaluating the admissibility of vessel motions during port operations. **Results.** The study was carried out in an experimental basin using a physical ship model designed according to the Froude similarity criterion. Two load conditions were considered – at full load and with 50 % load and full reserves for both cases. Ship motions were measured using accelerometers and inclinometers installed near the model’s center of gravity. Experimental data were processed using fast Fourier transform techniques. The results show that partial loading leads to increased amplitudes

*of vertical and longitudinal motions and longer oscillation periods. In contrast, full loading reduces motion amplitudes due to higher inertial properties. Transverse and yaw motions remained negligible. A satisfactory agreement between experimental results and analytical predictions was obtained. **Conclusions.** The study confirms the significant influence of loading condition on the dynamic behavior of a moored vessel. Physical modeling has proven to be an effective tool for assessing the safety of ship berthing under regular wave conditions. The proposed approach can be applied in port design and operation practice to justify allowable operating conditions and mooring arrangements without performing complex numerical simulations.*

**Key words:** *moored vessel; ship dynamics; regular waves; physical modeling; experimental research; motion amplitudes; mooring system; quay fenders; hydrometeorological conditions; port operation safety.*

**Вступ.** Розширення портової інфраструктури дозволяє суттєво підвищити пропускну спроможність портів. Часто нові причальні споруди розташовуються в недостатньо захищених від дії вітру і хвиль місцях акваторії порту. Під час проектування причальних споруд у відкритих або недостатньо захищених акваторіях особливого значення набуває задача дослідження поведінки судна, пришвартованого біля причалу, під дією вітру та хвилювання. Вирішення цієї задачі необхідне для забезпечення відповідності проектних рішень чинним нормативним документам, зокрема PIANC WG 115 (Standard for the Design of Fenders) [1] та РД 31.33.10-87 [2]. Вітрові та хвильові навантаження можуть спричинити переміщення судна, що ускладнюють виконання вантажно-розвантажувальних робіт і підвищують ризик пошкодження як корпусу судна, так і причальних конструкцій. Це, у свою чергу, негативно впливає на безпеку та ефективність портових операцій і зумовлює необхідність розроблення обґрунтованих режимів стоянки суден. Науково обґрунтований підхід до аналізу поведінки ошвартованого судна має базуватися на кількісному вивченні процесів його руху під впливом зовнішніх збурень. Особливу увагу при цьому слід приділяти впливу морського хвилювання, що надходить з відкритої акваторії, а також хвиль, утворених рухом великотоннажних суден у межах порту.

**Постановка проблеми.** Поведінка пришвартованого судна біля причалу визначається складною взаємодією гідродинамічних, конструктивних та експлуатаційних факторів. На судно впливають хвилі, течія, вітер, а також коливання рівня води і суднової хвилі від суден. Ці дії передаються через швартовну систему та кранці на корпус судна та причальну інфраструктуру, формуючи динамічні навантаження, які можуть суттєво перевищувати статичні значення. У загальному випадку дослідження руху судна біля причалу зводиться до розв'язання сполученої задачі взаємодії судна, причалу та навколишнього середовища, яка включає опис хвильового й вітрового полів, рух судна з шістьма ступенями свободи та реакцію швартовних канатів, що, як правило, має нелінійний характер. З огляду на складність такої задачі, її розв'язання здебільшого здійснюється чисельними методами. Незважаючи на розвиток аналітичних та чисельних методів моделювання, експериментальні дослідження залишаються основним джерелом достовірної інформації про реальні характеристики руху суден та навантаження у швартовних системах. Саме експеримент дозволяє виявити нелінійні ефекти, резонансні явища та масштабні особливості, які важко коректно врахувати у теоретичних моделях. У зв'язку

з цим експериментальні програми високого рівня відіграють ключову роль у розвитку сучасної теорії швартування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Одним із основних напрямків експериментальних досліджень є фізичні модельні випробування у хвильових басейнах. Найбільші лабораторії, такі як MARIN [3] і Deltares [4] протягом десятиліть виконують масштабні експериментальні програми, спрямовані на вивчення поведінки пришвартованих суден. Під час таких випробувань вимірюються всі шість ступенів свободи руху судна, зусилля у швартовних лініях та сили взаємодії з відбійниками. Масштабування експериментів здійснюється на основі критерію Фруда, що забезпечує коректну передачу гравітаційних та інерційних ефектів. При цьому використовуються спеціальні елементи, що імітують пружність та демпфування швартів та кранців. Однак основним обмеженням залишається масштабний ефект, особливо при моделюванні в'язких та контактних явищ.

Результати експериментальних досліджень використовують також для верифікації програмних комплексів динамічного аналізу швартування. Класичним прикладом є робота [5], де результати чисельного моделювання порівнювалися з даними фізичних експериментів. У рамках цієї програми було розглянуто кілька принципово різних конфігурацій: LNG-танкер біля відкритого причалу, судно біля гравітаційної платформи, вплив хвиль суден, що проходять, і тандемне швартування. До кожного випадку проводилися незалежні фізичні випробування, після чого виконувалось зіставлення з результатами чисельного моделювання. Показано, що сучасні динамічні моделі здатні досить точно відтворювати спектри коливань та пікові навантаження, якщо коректно задані гідродинамічні коефіцієнти та характеристики швартовної системи.

В роботі [6] досліджується розвиток моделювання руху пришвартованих суден, порівнюючи тривимірну чисельну модель з експериментальними даними, отриманими в лабораторії. Це також натурно орієнтоване дослідження, в якому дані фізичного експерименту використовуються для перевірки та покращення чисельної моделі.

В роботі [7] приведені результати фізичного експерименту на моделі судна, ошвартованій коло причальній стінці. Основною метою дослідження було порівняння «вільної» схеми швартування та схеми з попередньо натягнутими швартовними лініями з точки зору амплітуд коливань судна, зусиль у швартовах, стійкості положення біля причалу, ефективності демпфування. У ході експериментів варіювалися параметри хвилювання, жорсткість ліній та рівень попереднього натягу. Отримані дані використовувалися для оцінки можливості застосування tension mooring як засобу зниження динамічних навантажень та підвищення експлуатаційної стійкості суден у портах. Експерименти показали, що застосування натягнутих швартовів призводить до помітного зменшення амплітуд коливань у поперечно-горизонтальному напрямку в порівнянні з традиційною схемою. Використання tension mooring може бути ефективним рішенням для відкритих причалів, зон із регулярним хвилюванням, тимчасових стоянок. Однак метод вимагає ретельного інженерного розрахунку та посиленої швартовної інфраструктури.

На відміну від лабораторних випробувань, натурні експерименти проводяться безпосередньо в портах, що діють. Вони ґрунтуються на довготривалих вимірах руху суден та навантажень на швартовну систему з використанням

GPS, інерційних датчиків, тензодатчиків та хвилемірів. Найбільш відомі в цьому напрямі дослідження японського портового інституту [8], в рамках яких протягом місяців і років фіксувалися реальні коливання суден в умовах довготривалого хвилювання і сейшей. Такі дані мають унікальну цінність, оскільки відбивають реальні експлуатаційні умови. Натурні виміри показали, що навіть за відносно малої амплітуди хвиль у портах можуть бути значні горизонтальні коливання суден за рахунок резонансного збудження. Ці ефекти не враховуються у спрощених розрахункових методах, що призводить до помилок у проектуванні.

Найвищу достовірність результатів забезпечує комбінований підхід, що поєднує лабораторні випробування, натурні виміри та чисельне моделювання. Цей метод дозволяє враховувати як локальні особливості акваторії, так і індивідуальні характеристики суден. Він широко застосовується у міжнародних проектах під егідою PIANC [9] та OCIMF [10].

Аналіз найбільших експериментальних програм дозволяє виділити низку загальних закономірностей: рухи пришвартованих судів мають суттєво нелінійний характер і часто визначаються резонансними ефектами; пікові навантаження у швартовних лініях можуть значно перевищувати середні значення та повинні враховуватися під час проектування; характеристики кранців і швартовів надають суттєвий вплив на динамічний відгук системи; квазістатичні методи розрахунку руху пришвартованого судна прийнятні лише обмеженому діапазоні умов

**Формулювання цілей статті.** Ця стаття з'явилася по результатам експерименту, проведеного авторами в межах наукового-дослідницької роботи ОНМУ на замовлення компанії «ТЕХАГРО», що спеціалізується на проектуванні причалів. Один з проектів проєктувальника розташований в порту «Південний», в недостатньо захищеній зоні портової акваторії. Головне питання, що мало з'ясувати дослідження, стосувалося питань безпеки проведення вантажних робіт та експлуатації причального обладнання. Критичними для цих питань є визначення амплітуд вертикального переміщення та куту диференту, які в силу специфіки традиційних схем швартування, не мають компенсуючих моментів з боку швартовної системи.

У аналітичній частині наукового-дослідницької роботи було розроблено інженерну методику оцінки критичних амплітуд руху судна [11]. Метою експериментальної роботи було визначення амплітуд поступальних та кутових переміщень судна, ошвартованого до причалу в умовах мілководдя під дією регулярного хвилювання, що відповідало метеорологічним умовам завдання, та верифікація аналітичного методу оцінки амплітуд.

**Виклад основного матеріалу.** Як вище було відмічено, експериментальний метод дослідження поведінки пришвартованого судна лишається найбільш достовірним методом, особливо для проєктувальних робіт. Тому отримання характеристик його руху виконано із застосуванням фізичного моделювання в дослідному басейні ОНМУ.

**Об'єктом дослідження** є поведінка системи судно-причал в умовах регулярного хвилювання. Обраний «умовний» балкер з типовими для суден такого типу обводами. Розглянуті два варіанти навантаження із 100 % вантажу та 50 % вантажу при 100 % запасів для обох випадків.

Характеристики судна: довжина – 240 м; ширина – 38 м; дедвейт – 80 тис. т; осадка у повному завантаженні – 15 м наполовину завантаженого – 10,5 м;



на довгоперіодичних хвилях, що не відповідає завданню експерименту, і можна користуватися лінійним наближенням.

Процедура обрання масштабу виконана із урахуванням розмірів басейну та впливу його границь на показники хвилювання. Обраний масштаб моделі 1:131. Характеристики моделі: довжина між перпендикулярами  $L_{\text{пн}} = 2,061$  м; ширина  $B = 0,29$  м, осадка судна у повному вантажі  $d = 0,115$  м; у випадку 50 % завантаження  $d = 0,08$  м; водотоннажність вагова у вантажі  $D = 54,8$  кг, у випадку 50 % завантаження  $D = 38,3$  кг, густина води  $\rho = 1,0$  т/м<sup>3</sup>.

Характеристики розрахункової хвилі обрані на основі даних замовника та [2] про типові хвилі в прибережній зоні району північно-західної частини акваторії Чорного моря. Оскільки глибина акваторії біля причалу, що розглядається становить  $H = 17$  м, для визначення параметрів хвилі, зважаючи на характеристики судна, застосовані вирази для мілководдя. Висота хвилі дорівнює 3,5 м. Довжина хвилі спостерігаєма  $\lambda = 55$  м. Відповідно крутизна хвилі складає  $\bar{h} = h/\lambda = 1/15,71$ . Характеристики модельної хвилі: довжина  $\lambda = 0,42$  м, хвильове число  $k = 14,97\text{м}^{-1}$ , частота  $\sigma = 11,87\text{с}^{-1}$ , період  $\tau = 0,529$  с.

Модель балкери виконана в дослідному басейні ОНМУ та пройшла динамічне тарювання в процесі якого визначені значення поздовжнього та поперечного  $\rho^x$  і  $\rho^y$  радіусів інерції мас для двох розглянутих випадків навантаження. Визначення радіусів інерції мас судна виконано шляхом визначення періоду вільних коливань судна в повітрі.

Експериментальна установка. Для проведення експериментальних досліджень на мілководді в дослідному басейні ОНМУ передбачена можливість встановлення подвійного дна. Регулярні прогресивні хвилі створюються за допомогою пластинчастого хвилепродуктора, який приводиться в дію за допомогою електродвигуна потужністю 3 кВт. Електродвигун оснащений блоком частотного керування Schneider Electric, що дозволяє регулювати частоту генерації хвиль з точністю до 0,1 Гц. Рисунок 2 демонструє розташування судна і причалу відповідно руху хвиль.

**Підбір висоти хвилі.**  $h_{\text{ф}} = f(\sigma_{\text{м}}, r_{\text{вп}}, K_{\text{вп}})$  – фактична висота хвилі, яка підбирається в процесі підготовки до експерименту;  $|h_{\text{ф}} - h_{\text{м}}| \leq \varepsilon$ , де  $\varepsilon = 2$  мм із урахуванням особливостей пластинчастого хвилепродуктора і нерівномірності генерації регулярного хвилювання;  $K_{\text{вп}}$  – коефіцієнт редуктора хвилепродуктору;  $r_{\text{вп}}$  – радіус встановлення коромисла хвилепродуктору. Підбір  $h_{\text{ф}}$  здійснений за допомогою датчика висоти хвилі струнного типу. Вказаний датчик цифрового

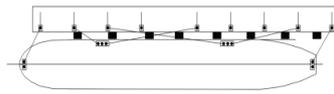
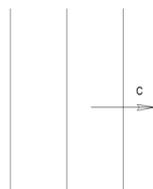


Рис. 2. Схема швартування судна до причалу

типу передає сигнал на аналогово-цифровий перетворювач / регістратор LCard L-14140 і далі на персональний комп'ютер для формування файлу даних. Висота хвилі була підібрана при фіксованих характеристиках хвилювання до початку експериментальних досліджень. При цьому датчик хвилі був розташований в місті розміщення моделі в середній частині басейну. Додатковий контроль висоти хвилі здійснювався візуально за допомогою спеціальної мірної шкали, розташованої на борту басейна та цифрової фотокамери Nikon 5200.

**Підготовка до проведення випробувань** проходила у декілька етапів: підбір характеристик регулярного хвилювання; виконання дослідів кренування для двох випадків завантаження; підбір радіусів інерції для двох випадків завантаження; встановлення моделі і закріплення її до причалу; проведення експерименту з фіксацією діючих прискорень та нахилів в процесі руху судна. Проведення відеофіксації поведінки моделі на хвилюванні. Для апаратного контролю випробувань використані цифрові пристрої – акселерометр та інклінограф, які встановлювалися на модель судна в районі центру ваги.

Інклінограф в одному компактному пристрої поєднує акселерометр 3-осьовий, GY-291 ADXL345, бібліотеку SparkFun\_ADXL345; інклінометр ADuC845/ADXL103; wi-fi сервер для безпроводної передачі даних; джерело постійного струму (аккумулятор 18860).

За результатами випробувань було отримано данні акселерометра по прискоренням поступальних рухів судна для випадків 100 % та 50 % навантаження моделі. За цими даними перераховуються власно процеси поступальних переміщень за наступною схемою. Прискорення коливального процесу та власно процес пов'язані відношенням  $\ddot{x}_i = -(2\pi f_i)^2 x_i$ , тому амплітуда процесу дорівнює амплітуді прискорення, поділеної на  $-(2\pi f_i)^2$ . Перерахунок модельних значень на натурні здійснюється порівнянням безрозмірних виразів прискорень для природи та моделі:  $\frac{A_n}{h_n} (2\pi\sigma_n)^2 \cos(2\pi\tilde{t}) = \frac{A_m}{h_m} (2\pi\sigma_m)^2 \cos(2\pi\tilde{t})$ .

**Обробка даних** здійснювалася наступним образом: за даними акселерометра відносно прискорень моделі за формулою  $A_n = \frac{h_n}{h_m} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \right)^2 A_m$  було перераховано

значення прискорення для природи; методом швидкого перетворення Фур'є отримано їх амплітудні спектри  $A_i(f)$ ; аналітичний вираз прискорення представлений сумою  $n$  осциляцій з істотними значеннями частот  $f_i^j$  з піковими амплітудами  $A_i^j$  у вигляді  $\ddot{x}_i = \sum_j^n A_i^j \cos(2\pi f_i^j t)$ ; аналітичний вираз власно переміщень отримано у вигляді суми  $x_i = \sum_j^n \frac{A_i^j}{(2\pi f_i^j)^2} \cos(2\pi f_i^j t)$ . Конструктивною особливістю функ-

ціонування інклінометра є високою чутливістю до високочастотних вібрацій, які неможливо виключити в таких грубих випробуваннях, де очікуванні результати мають порядок  $10^{-1}$  м та  $10^{-1}$  с. Тому данні по кутових переміщеннях було відфільтровано методом швидкого перетворення Фур'є. На рис. 3–5 представлені графіки перерахованих на натурне судно результатів модельних замірів амплітуд та кутів нахилу.

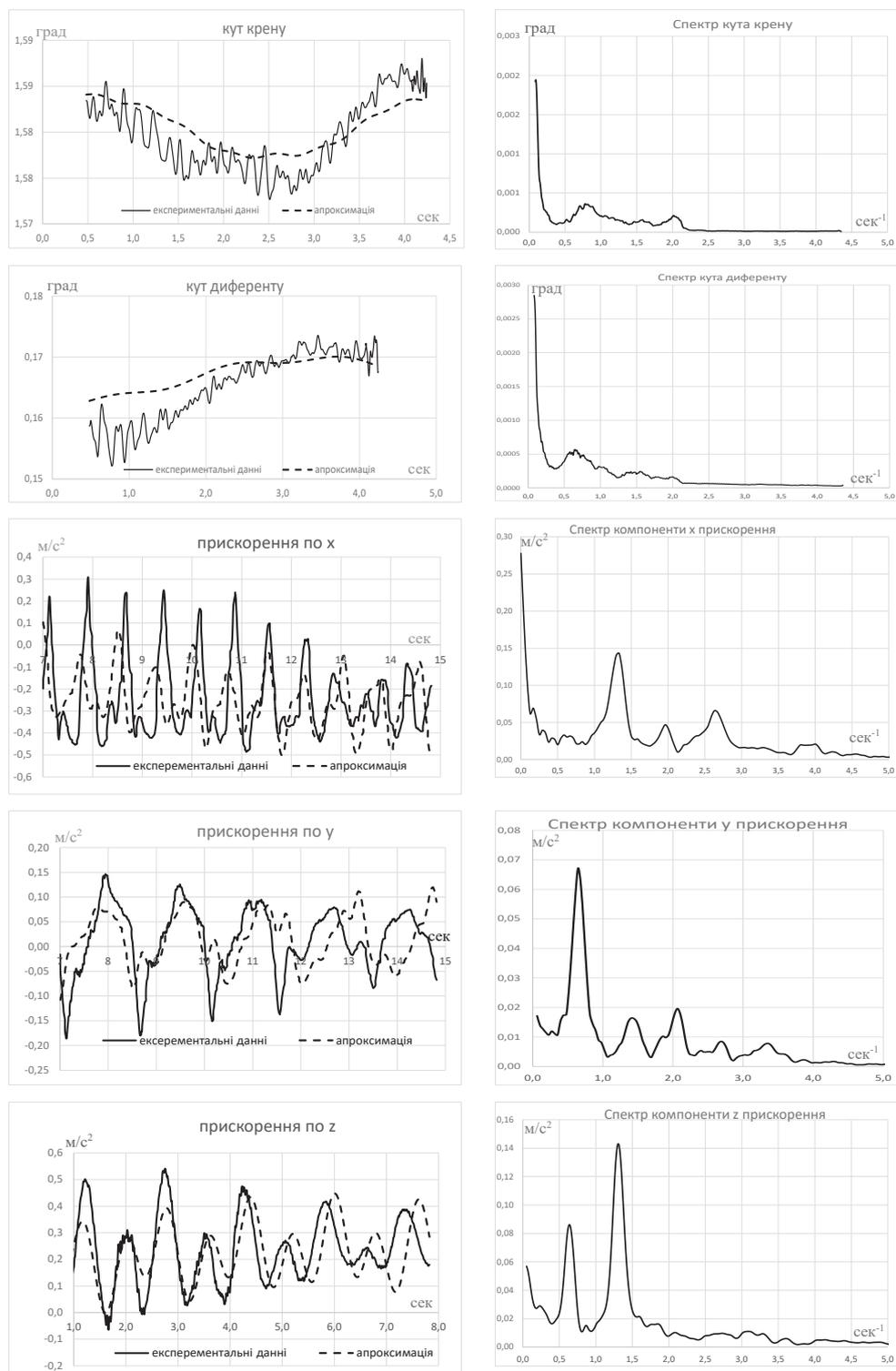


Рис. 3. Данні по поступовим прискоренням та кутовим переміщенням судна при 50 % навантаження

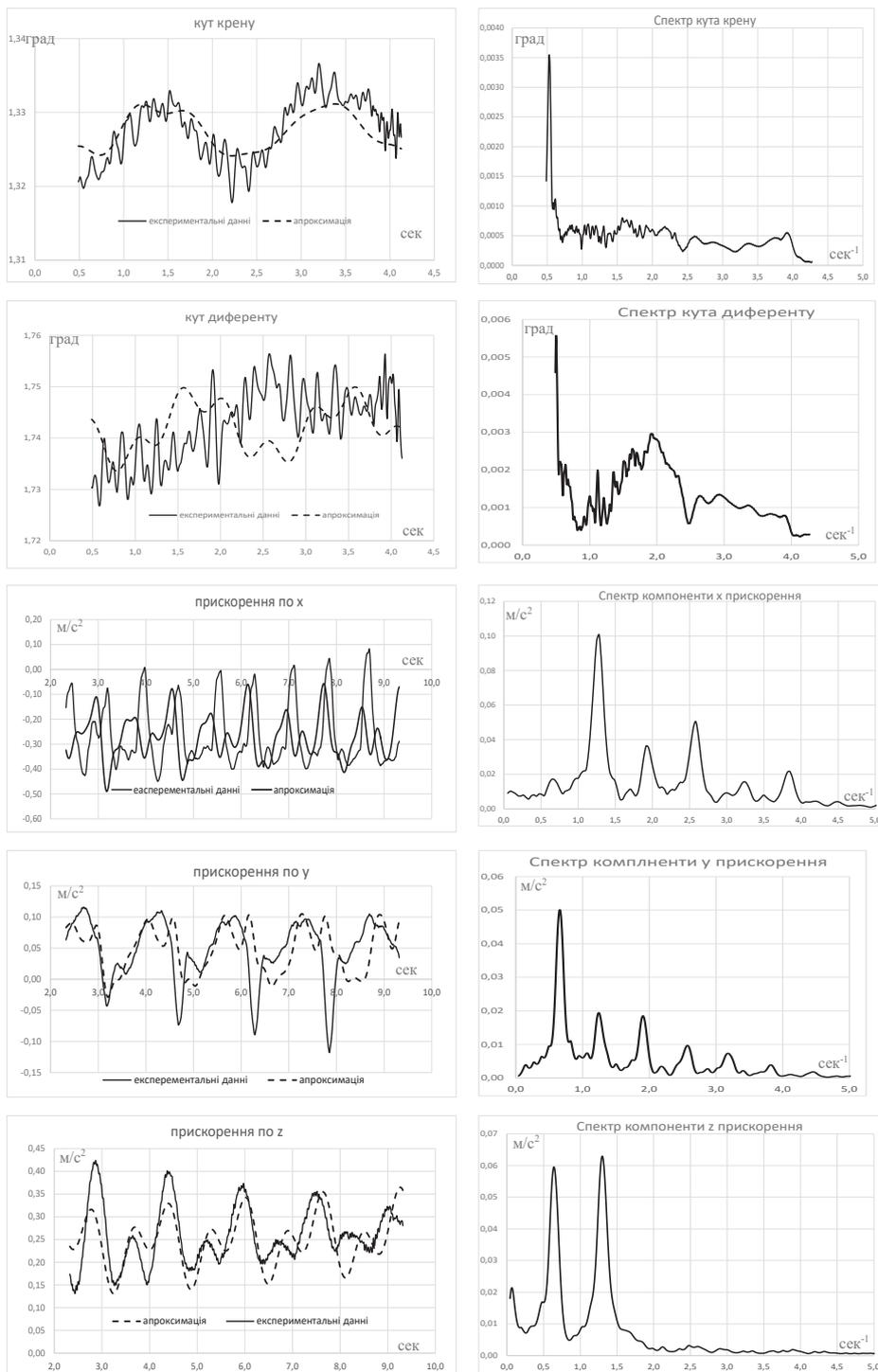


Рис. 4. Данні по поступовим прискоренням та кутовим переміщенням судна при 100 % навантаження

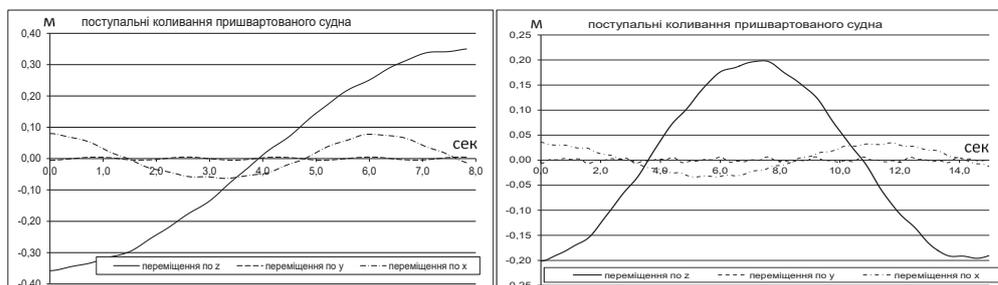


Рис. 5. Розраховані поступові переміщення відповідним експериментальним прискоренням судна: а) при 50 % навантаження; б) при 100 % навантаження

З графіків рис. 5 видно, що при 50 % навантаженні судно буде здійснювати вертикальні переміщення з амплітудою до 0,4 м і періодичністю 14–15 с, та повздовжні коливання з амплітудою до 0,1 м з періодичністю 6сек. При 100 % навантаження судно буде здійснювати вертикальні коливання з амплітудою 0,2 м з періодичністю теж 14 с. Повздовжні коливання зменшали амплітуду до 0,05 м, а період збільшився майже вдвічі – до 12 с. Така зміна характеристик цілком зрозуміла, бо збільшилася інерція судна. Майже відсутнє коливання в поперечному напрямку та кути ристання в обох випадках. Це пояснюється відсутністю моделювання динамічної роботи швартовних тросів, де враховується фактор часу їх деформації. Але, як вже було сказано вище, це моделювання потрібне у випадку довгих хвиль, коли зміщення значне та розтягування тросів перевищує межі лінійного закону їх пружної деформації. В даній роботі зусилля, що виникають у тросах, пропорційні їх деформації.

Інклінометр зафіксував стаціонарні кути крену та диференту, отримані моделлю судна в наслідок причалювання. Для випадку 50 % навантаження стаціонарний кут крену дорівнює  $1,58^\circ$ , а кут диференту –  $0,16^\circ$ . Для випадку 100 % навантаження стаціонарний кут крену дорівнює  $1,325^\circ$ , а кут диференту –  $1,745^\circ$ . Бортова хитавиця в обох випадках майже відсутня, що обумовлено напрямком розповсюдження хвиль в розріз носової частини моделі. Кілева хитавиця майже відсутня через швартовну схему з відсутніми повздовжніми тросами і короткими притискними, майже перпендикулярними до корпусу моделі.

Данні експерименту дуже добре корелюють зі значеннями відповідних величин, що були розраховані аналітичним методом з системи лінійних рівнянь руху судна. В таблиці 1 вони приведені для порівняння.

Також цілком виконуються нерівності  $\sum_{l=1}^6 (|f_{kl}^c(\bar{l}_i)| - |a_{kl}|) + |f_l^0(\bar{l}_i)| - k(A) \frac{|b_l|}{\varepsilon_l} \leq 0, k = 1, 6$ , що втілюють метод перевірки відповідності рухів судна нормативним обмеженням портів служб без розв'язання повної системи диференціальних рівнянь. Тут лише треба нагадати, що кожна з нерівностей є оцінкою норми строки матриці динамічної системи «судно-швартовна система-причал», що залежать від попереднього натягу тросів та геометрії та впливу зовнішніх сил. У таблиці 2 наведено значення цих норм. Як видно, для обох випадків нерівності виконані.

Таблиця 1

**Порівняння експериментальних та розрахункових даних**

Кінематичні характеристики судна при 50 % навантаження						
	x	y	z	roll	pitch	yaw
Експеримент	0,09	~ 0	0,35	0,02	0,01	~ 0
Розрахунок	0,03	~ 10 <sup>-4</sup>	0,34	~ 10 <sup>-7</sup>	0,003	~ 10 <sup>-5</sup>
Кінематичні характеристики судна при 100 % навантаження						
Експеримент	0,04	~ 0	0,20	0,01	0,02	~ 0
Розрахунок	0,02	~ 10 <sup>-4</sup>	0,22	~ 10 <sup>-6</sup>	0,001	~ 10 <sup>-5</sup>

Таблиця 2

**Валідація методу перевірки відповідності рухів судна  
встановленим обмеженням**

Оцінка для судна при 50 % навантаження						
№ тросу	Координати векторів тросів	Експериментальні значення,		Допустимі межі амплітуд		Оцінка нерівності
1f	(L, 0.5B, 0.3T)	x <sub>G</sub> , М	0,04	ε <sub>1</sub> , М	0,1	- 0,65
2f	(0.5L, 0.5B, 0.3T)	y <sub>G</sub> , М	0	ε <sub>2</sub> , М	0,1	- 1,04
3f	(0.25L, 0.5B, 0.3T)	z <sub>G</sub> , М	0,2	ε <sub>3</sub> , М	0,5	- 1,67
3a	(-0.25L, 0.5B, 0.3T)	φ, рад.	0,01	ε <sub>4</sub> , рад.	0,017	- 1,0
2a	(-0.5L, 0.5B, 0.3T)	ψ, рад.	0,02	ε <sub>5</sub> , рад.	0,017	- 1,0
1a	(-L, 0.5B, 0.3T)	θ, рад.	10 <sup>-6</sup>	ε <sub>6</sub> , рад.	0,017	- 1,0
Оцінка для судна при 100 % навантаження						
1f	(L, 0.5B, 0.3T)	x <sub>G</sub> , М	0,04	ε <sub>1</sub> , М	0,1	- 0,76
2f	(0.5L, 0.5B, 0.3T)	y <sub>G</sub> , М	0	ε <sub>2</sub> , М	0,1	- 1,03
3f	(0.25L, 0.5B, 0.3T)	z <sub>G</sub> , М	0,2	ε <sub>3</sub> , М	0,5	- 1,44
3a	(-0.25L, 0.5B, 0.3T)	φ, рад.	0,01	ε <sub>4</sub> , рад.	0,017	- 1,0
2a	(-0.5L, 0.5B, 0.3T)	ψ, рад.	0,02	ε <sub>5</sub> , рад.	0,017	- 1,0
1a	(-L, 0.5B, 0.3T)	θ, рад.	10 <sup>-6</sup>	ε <sub>6</sub> , рад.	0,017	- 1,0

**Висновки.** У роботі проведено експериментальне дослідження динаміки великотоннажного балкера, пришвартованого до причалу, під дією регулярного хвилювання в умовах мілководдя. Для цього було реалізовано фізичне моделювання в дослідному басейні з дотриманням критерію подібності Фруда та з урахуванням конструктивних і технологічних обмежень лабораторного обладнання.

У ході експерименту отримано дані щодо прискорень, поступальних і кутових переміщень судна для випадків повного та часткового завантаження. Обробка експериментальних результатів із використанням спектрального аналізу дозволила визначити домінуючі частоти та амплітуди коливань, а також виконати коректний перерахунок модельних значень на натурні умови.

Встановлено, що умови завантаження істотно впливають на характер руху пришвартованого судна. При частковому завантаженні спостерігається зростання амплітуд вертикальних і повздовжніх переміщень та збільшення періодів коливань, що зумовлено зменшенням інерційних характеристик судна. Водночас

при повному завантаженні рух судна є більш стабільним, а амплітуди коливань зменшуються.

Показано, що за розглянутого напрямку поширення хвиль і прийнятої схеми швартування поперечні та курсові коливання залишаються незначними. Це свідчить про ефективність обраної конфігурації швартовної системи в умовах регулярного хвилювання.

Порівняння експериментальних даних із результатами аналітичних розрахунків, виконаних на основі лінійної математичної моделі руху судна, підтвердило їх задовільну узгодженість. Це дозволяє вважати запропоновану модель та розроблений метод оцінки амплітуд руху придатними для практичного використання.

Підтверджено можливість застосування запропонованого підходу для перевірки відповідності рухів судна нормативним обмеженням портових служб без розв'язання повної системи диференціальних рівнянь. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування режимів стоянки суден, вибору раціональних схем швартування та підвищення безпеки вантажно-розвантажувальних робіт у недостатньо захищених акваторіях портів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. U.S. Department of Defense. Military and Government Mooring Design (UFC 4-150-06) [Електронний ресурс]. 2023. URL: <https://www.wbdg.org>
2. Рекомендації щодо обліку гідрометеорологічного режиму при проєктуванні недостатньо захищених від хвилювання причалів: РД 31.33.10-87. Одеса : ЧОРНОМОРНІПРОЄКТ, 1987. 56 с.
3. Deltares. Scale model tests of moored vessels (Delta Basin) [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/validation-tests-for-innovative-mooring-technology-in-ports-of-the-future/>
4. MARIN ; Deltares. Benchmarking and model validation projects for moored vessel response (HAWA-III JIP) [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://ferforum.com/wp-content/uploads/2023/04/Project-Plan-HAWAI-3-JIP-Detailed-Description-Rev-1.4-June-2022-APPENDIX-A.pdf>
5. Harkin S., Mortensen J., Dixen M. Validation of Moored Vessel Response Simulator with Physical Model Comparisons [Електронний ресурс]. – DHI Group Technical Publication, 2017. URL: [https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin\\_2017.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin_2017.pdf)
6. Aida Y., Hirayama K. Development of analysis method of moored ship motion in 3D fluid field : PARI Report No. 58-1-1. Yokosuka : Port and Airport Research Institute, 2019. August.
7. Ueda S., Shiraishi S., Oshima H., Asano K. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '94). 1994. P. 451–460.
8. Port and Airport Research Institute. Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency : PARI Report No. 026-05-09 [Електронний ресурс]. 1987. URL: <https://www.pari.go.jp/en/1987/12/1987120260509.html>

9. PIANC. Assessment of seakeeping and manoeuvring of moored ships / harbour resonance and other related issues : PIANC Working Group Reports [Електронний ресурс]. URL:<https://www.pianc.org/publications/working-group-reports>
10. OCIMF. Mooring Equipment Guidelines (MEG4). London : Oil Companies International Marine Forum, 2018.
11. Александровська Н.І., Демідюк А.В., Косой М.Б. Науково-технічне та інформаційне забезпечення вирішення питання про екстремальні навантаження на швартовні пристрої судна та причалу при вантажних операціях в умовах хвилювання: звіт про НДР / Одеський національний морський університет; за Договором № 02-НДІ/2025 від 23 червня 2025 року. Одеса, 2025. 21 с.

### REFERENCES

1. U.S. Department of Defense. (2023). Military and government mooring design (UFC 4-150-06). Whole Building Design Guide. <https://www.wbdg.org>
2. Chornomorniiproekt. (1987). Recommendations for Considering Hydrometeorological Conditions in the Design of Insufficiently Wave-Protected Berths [Rekomendatsii shchodo obliku hidrometeorolohichnoho rezhymu pry proiektuvanni nedostatno zakhyshchenykh vid khvyliuvannia prychaliv (RD 31.33.10-87)]. Odesa [in Ukrainian].
3. Deltares. (2021). Scale model tests of moored vessels (Delta Basin). URL: <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/validation-tests-for-innovative-mooring-technology-in-ports-of-the-future/>
4. MARIN, & Deltares. (2022). Benchmarking and model validation projects for moored vessel response (HAWA-III JIP). URL: <https://ferforum.com/wp-content/uploads/2023/04/Project-Plan-HAWAI-3-JIP-Detailed-Description-Rev-1.4-June-2022-APPENDIX-A.pdf>
5. Harkin, S., Mortensen, J., & Dixen, M. (2017). Validation of moored vessel response simulator with physical model comparisons. DHI Group. URL: [https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin\\_2017.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike21/Harkin_2017.pdf)
6. Aida, Y., & Hirayama, K. (2019). Development of analysis method of moored ship motion in 3D fluid field (PARI Report No. 58-1-1). Port and Airport Research Institute.
7. Ueda, S., Shiraishi, S., Oshima, H., & Asano, K. (1994). Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. In Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM '94) (pp. 451–460).
8. Port and Airport Research Institute. (1987). Motions of moored ships and their effect on wharf operation efficiency (PARI Report No. 026-05-09). URL: <https://www.pari.go.jp/en/1987/12/1987120260509.html>
9. PIANC. (n.d.). Assessment of seakeeping and manoeuvring of moored ships: Harbour resonance and other related issues. URL: <https://www.pianc.org/publications/working-group-reports>

10. OCIMF. (2018). Mooring equipment guidelines (4th ed.). Oil Companies International Marine Forum.
11. Aleksandrovska, N.I., Demidiuk, A.V., Kosoi, M.B. (2025). Scientific and Technical and Information Support for Solving the Problem of Extreme Loads on Ship and Quay Mooring Devices during Cargo Operations under Wave Conditions (Research report) [Naukovo-tehnichne ta informatsiine zabezpechennia vyrishennia pytannia pro ekstremalni navantazhennia na shvartovni prystroi sudna ta pryhalu pry vantazhnykh operatsiiakh v umovakh khvyliuvannia]. Odessa National Maritime University.

Дата першого надходження статті до видання: 30.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025