


UDC 629.5.015.1

DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.99-113

IMPROVING THE METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR LABORATORY STUDIES OF SHIP SEAKEEPING QUALITIES

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНОЇ БАЗИ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДОСЛІДЖЕННЯ МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДНА

M. Dulgheru, cadet of the ESI of navigation, **Yu. Kucher**, senior lecturer,
A. Pechenyuk , head of dept. "TSS", Ph.D., associate professor

М. Дулгеру, курсант ННІ навігації, **Ю. Кучер**, ст. викладач,
А. Печенюк, зав. каф. "ТУС", к.т.н., доцент

National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

This paper discusses improvements to the methodological support of a laboratory course on ship seaworthiness. The course uses an experimental facility based on a scale ship model and is intended to help students understand the relationship between loading conditions and ship stability, compare theoretical calculations with model-test results, and apply stability criteria in practice. Processing the experimental data requires accurate hydrostatic characteristics of the model hull. Therefore, the laboratory course can be significantly improved by extending and refining the available hydrostatic data without modifying the experimental apparatus. The geometry of the model hull was reconstructed using reverse-engineering techniques. A CAD model was developed from laser scans of the outer surface of the scale model and then used to calculate hydrostatic elements and cross-curves of stability. The resulting hydrostatic tables are more detailed than those previously available and provide a more convenient basis for accurate student calculations. The newly obtained cross-curves of stability, which were absent from the existing laboratory manuals, make it possible to substantially improve the laboratory work devoted to constructing curves of statical stability and allow students to perform independent calculations for different loading conditions. The proposed approach was tested for several loading conditions of the model. In addition, methods for evaluating measurement errors were analyzed. Based on this analysis, an additional randomness check for small samples and an uncertainty evaluation procedure using Student's t-distribution are recommended. The results can be used to improve both the experimental and calculation components of the laboratory course.

Keywords: experimental study of ship stability, scale models for stability trainings, reverse engineering in shipbuilding, statistical processing of measurement errors, laboratory works in maritime education.



Copyright© 2026 the Author(s).

This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

Published by the National University "Odesa Maritime Academy".

Date received: 31-03-2026
Date accepted: 01-05-2026
Date published (online): 31-05-2026

Cite this article as: M. Dulgheru, Yu. Kucher and A. Pechenyuk, "Improving the methodological framework for laboratory studies of ship seakeeping qualities," *Shipping & Navigation*, no. 39, pp. 99–113, 2026, doi: 10.31653/2306-5761.39.2026. 99-113.

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто удосконалення методичного забезпечення лабораторних робіт з навчальної дисципліни, присвяченої морехідним якостям судна. Лабораторні роботи виконуються з використанням експериментальної установки на основі масштабної моделі судна та спрямовані на формування у студентів розуміння взаємозв'язку між умовами завантаження й остійністю судна, зіставлення теоретичних розрахунків із результатами модельних експериментів, а також практичне застосування критеріїв остійності. Оброблення експериментальних даних потребує точних гідростатичних характеристик корпусу моделі. У зв'язку з цим розширення та уточнення наявних гідростатичних даних дає змогу істотно вдосконалити лабораторні роботи без внесення змін до експериментальної установки. Геометрію корпусу моделі було відтворено із застосуванням технологій реверс-інжинірингу. На основі лазерного сканування зовнішньої поверхні масштабної моделі судна побудовано САД-модель, яку надалі використано для розрахунку гідростатичних елементів і пантокарен остійності. Отримані гідростатичні таблиці є більш деталізованими порівняно з тими, що використовувалися раніше, і забезпечують зручнішу основу для виконання точних розрахунків. Пантокарен остійності, які були відсутні в наявних методичних матеріалах, можуть бути використані для суттєвого вдосконалення лабораторної роботи, присвяченої побудові кривих статичної остійності, та забезпечують можливість самостійного виконання розрахунків для різних варіантів завантаження моделі. Запропонований підхід було апробовано для кількох станів завантаження моделі. Крім того, проведено комплексний аналіз методів оцінювання похибок вимірювань. За результатами цього аналізу рекомендовано виконувати додаткову перевірку випадковості малих вибірок, а також оцінювати невизначеність вимірювань із використанням розподілу Стьюдента. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення як експериментальної, так і розрахункової складових лабораторних робіт.

Ключові слова: експериментальне дослідження остійності судна, масштабні моделі для вивчення остійності, зворотна розробка у суднобудуванні, статистична обробка похибок вимірювань, лабораторні роботи у морській освіті.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Використання модельних експериментів у навчанні спеціалістів морської галузі є традиційним. Сформувавши уявлення про фізику водного середовища навряд чи можливо лише за допомогою теоретичних формул. Тим більше, що підготовка по експлуатаційних спеціальностях за об'єктивних причин здебільшого концентрується на практичних питаннях. В НУОМА відповідна підготовка здійснюється у вигляді лабораторного практикуму з дослідження морехідних якостей судна. Його вдосконалення і оновлення у зв'язку з поточними потребами навчального процесу є актуальною задачею.

Незважаючи на традиційність модельного експерименту, саме деякі сучасні технології дозволяють суттєво вдосконалити його методологічну базу за рахунок цифровізації

даних, що використовуються у розрахункових частинах робіт, при обробці експериментальних результатів та оцінці похибок вимірювань. Якщо мова йде про застосування до існуючої експериментальної установки, такі технології мають характер зворотної розробки.

Одним зі складних завдань зворотної розробки у морській галузі є отримання даних про форму поверхні корпусу існуючого судна в умовах відсутності або недосконалості відповідних креслень. Дані по теоретичній поверхні корпусу є важливими не тільки з точки зору проектування суден, але й складають основу експлуатаційної документації по контролю плавучості, остійності та інших морехідних якостей. При цьому підводна поверхня корпусу зазвичай відрізняється значною складністю та є доступною для вимірювань тільки під час знаходження судна у доці. Оскільки відповідні процедури донедавна потребували

значного часу, вони не завжди були виправданими за строками або вартістю. В теперішній час ситуація змінилася завдяки можливості застосування автоматичного лазерного 3D сканування.

У статті представлені результати вдосконалення методологічної бази лабораторних робіт, виконаного з використанням суднобудівних технологій зворотної розробки, застосованих до існуючої масштабної моделі судна зі складу експериментальної установки НУОМА. Комплекс виконаних робіт включає обробку даних лазерного сканування, побудову тривимірної аналітичної моделі судової поверхні, підготовку розширених даних і методів розрахунків для включення до лабораторних робіт. Відповідні дослідження виконані в рамках науково-дослідної роботи № ДР 0124U002295 від 04.03.2024 р.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми

Зміни у технологіях зворотної обробки, пов'язані з впровадженням цифрового автоматичного лазерного 3D сканування, відмічені у багатьох сучасних дослідженнях і публікаціях. Сама по собі технологія лазерного сканування є загальною у машинобудуванні, вона була застосована у різноманітних практичних задачах (наприклад, [1, 2]). Побудова тривимірних аналітичних моделей судових поверхонь з метою вирішення проєктних задач суднобудування розглядалася у роботах [3-5]. Початок розв'язання безпосередньо розглянутої у статті проблеми був представлений у [6]. У порівнянні з нею, дана стаття містить повні результати дослідження, а також їх вичерпний аналіз і пропозиції по змінам у лабораторному практикумі.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціллю даної статті є викладення та аналіз результатів робіт по вдосконаленню

методологічної бази лабораторних робіт з дослідження морехідних якостей судна, виконаних з використанням суднобудівних технологій зворотної розробки.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Експериментальна установка та особливості лабораторних робіт

1.1. Експериментальна установка для дослідження морехідних якостей судна

В рамках підготовки курсантів НУОМА з дисциплін, присвячених вивченню теорії судна та його морехідних якостей, передбачений комплекс лабораторних робіт, що виконуються на експериментальній установці «Малий дослідний басейн для дослідження плавучості, остійності, непотоплюваності та вільних бортових коливань судна на тихій воді». Експериментальна установка представляє собою модель судна, що знаходиться на плаву у спеціальному баку з водою, встановленому у приміщенні лабораторії – рис. 1.

Установка спроектована таким чином, щоб забезпечувати вільні рухи моделі по трьох ступенях свободи: вздовж вертикальної осі (по осадці); навколо поперечної горизонтальної осі (по диференту); навколо повздовжньої горизонтальної осі (по крену). Рух по перших двох напрямках обмежений у відносно вузькому діапазоні, в той час як по крену – у досить широкому. Рухи по трьох інших ступенях свободи заблоковані для утримання моделі у певному положенні по відношенню до баку. Установки такого типу є досить поширеними у спеціалізованій морській освіті [7-9]. Вони дозволяють розглядати різноманітні задачі статички судна (в залежності від будови моделі та її обладнання) та деякі задачі хитамиці на тихій воді.

Експериментальна установка НУОМА відноситься до серії, що була розроблена і виготовляється у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК). Модель судна відображає малий

траловий бот проекту 70001, типу «Піріта» (рис. 2), у масштабі 1:10. Відмітимо, що з навчальних та практичних міркувань у подібних установках доцільними є моделі суден з малим відносним подовженням (великою шириною по відношенню до довжини). Це дозволяє при помірній довжині моделі (від якої суттєво залежать також розміри та вага всієї установки) мати показники остійності, зручні для демонстрації її змін при переміщенні невеликих, але відчутних вантажів. Реальні судна здебільшого мають велике відносне подовження, тому далеко не всі з них підходять у якості прототипів моделі. Можуть використовуватися і абстрактні моделі, які лише віддалено нагадують реальні судна. Але, на наш погляд, використання реалістичних обводів та достатньо висока деталізація значно покращують сприйняття матеріалу курсантами, що є особливо важливим для здобувачів освіти експлуатаційних спеціальностей.



Рис. 1. Експериментальна установка для дослідження морехідних якостей судна

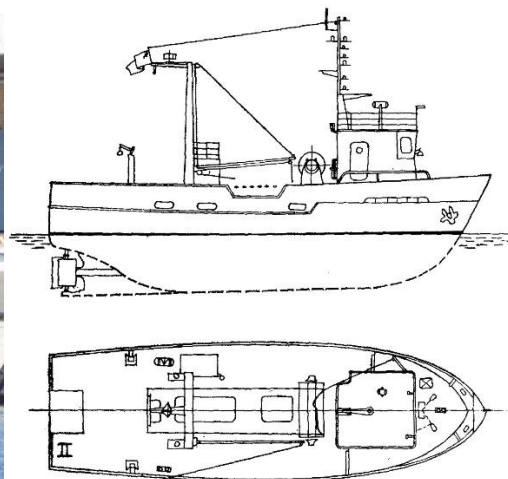
1.2. Особливості розрахунків статики судна та відповідних лабораторних робіт

Характерною особливістю більшості задач статики судна є їхній тісний зв'язок з геометричними параметрами підводної частини корпусу, тобто зануреної частини судна, що плаває у воді. Виникнення цієї науки пов'язується з ім'ям Архімеда, а саме з вирішенням ним задачі про золоту корону [10].

Схожість задач статики судна з даною задачею полягає в тому, що корпуси суден, як правило, мають складну геометричну форму, яку не можна описати ані невеликим набором розмірів, ані більш-менш простим математичним рівнянням. Форма корпусу втілює в собі велику кількість різноманітних, частково суперечливих проектних вимог, компроміс між якими налаштовується індивідуально в рамках кожного проекту. В сучасних умовах форма корпусу проектується за допомогою спеціалізованих програмних комплексів (ПК) або САПР (система автоматизованого проектування) у вигляді тривимірної поверхні. Традиційними формами представлення даних по судновій поверхні у проектній документації є теоретичне креслення судна та таблиця ординат суднової поверхні.

У типових експлуатаційних задачах (зокрема, у [11]) зазвичай шукають розрахункове положення судна на поверхні води (посадку) та показники остійності при заданій масі та положенні центра ваги. Оскільки маса судна завжди включає змінну частину (дедвейт), вона може бути суттєво різною в різних рейсах, особливо у вантажних суден. Склад дедвейту, загальна маса судна (водотоннажність) та координати центра ваги перед кожним наступним рейсом розраховуються судноводієм при підготовці вантажного плану. Характеристики ж зануреного об'єму, як і масу порожнього судна, отримують по даних у документації, підготовлених під час проектування судна у широкому діапазоні, що охоплює усі можливі експлуатаційні та аварійні випадки. Даний підхід ґрунтується на тому, що форма корпусу судна не змінюється з моменту його побудови. В сучасній практиці вказані розрахунки значною мірою автоматизовані за допомогою спеціальних бортових програмних комплексів.

На відміну від експлуатаційних розрахунків, лабораторні роботи (зокрема ті, що присвячені досліду кренування, дослідженню впливу підвішених та рідких вантажів, впливу додавання та переміщення вантажів на початкову остійність,



Довжина найбільша, м	18,13	Водотоннажність, т	63,8
Ширина найбільша, м	5,40	Дедвейт, т	25,6
Осадка у вантажі, м	1,97	Вантажопідйомність, т	12,0

Рис. 2. Прототип моделі судна - малий траловий бот проекту 70001 «Піріта»

експериментальному визначенню діаграми статичної остійності) дозволяють фіксувати параметри остійності безпосередньо дослідним шляхом, за допомогою вимірювань. Це розраховано на краще розуміння впливу тих чи інших змін у масовому навантаженні на посадку та остійність; дозволяє перевіряти свої розрахунки і, таким чином, отримати впевненість у реалістичності розрахункових показників. Однак, характеристики зануреного об'єму, подібно до експлуатаційних розрахунків, отримуються за даними документації до експериментальної установки. Це є доцільним як з точки зору будови установки, так і формування у курсантів вміння працювати з технічною документацією.

В лабораторних роботах, присвячених задачам початкової остійності основою теоретичних розрахунків є гідростатичні таблиці моделі (криві елементів теоретичного креслення). У лабораторному практикумі НУК [12] вони надані для широкого діапазону осадок $0 \div 0,247$ м, але з доволі крупним та дробовим кроком 0,019 м. Між тим, модель має досить стабільну середню осадку, оскільки зміни маси під час лабораторних

робіт є відносно малими. Тому більш зручним був би варіант гідростатичних таблиць з малим кроком, який до того ж краще відповідав би конструкції марок занурення моделі, що мають крок ділень 2 мм. Іншим недоліком документації [12] є відсутність даних про плечі остійності форми (пантокарени), які можна було б використовувати для розрахункової побудови діаграм статичної остійності. Така побудова передбачена при самостійному (ручному) розрахунку і в експлуатаційних умовах, тому її відображення у лабораторних роботах видається актуальною задачею.

2. Отримання гідростатичних даних для вдосконалення документації експериментальної установки за допомогою методів зворотної розробки

2.1. Сканування моделі, обробка даних та побудова 3D моделі суднової поверхні

Сучасним способом отримання гідростатичних даних є обчислення на основі віртуальної 3D моделі суднової поверхні у спеціалізованій САПР для проектування суден. Побудова 3D моделі існуючого судна можлива на основі таких вихідних даних, як теоретичне креслення, таблиця координат

теоретичного креслення або дані лазерного 3D сканування. Перші два варіанти передбачають використання проектною документації судна. Сучасні судна можуть і від початку проектуватися з використанням 3D моделювання, тобто відповідна модель може зберігатися у проектувальника, хоча зазвичай вона не входить до експлуатаційного комплексу документів. За відсутності ж документації побудувати 3D модель судової поверхні можна за допомогою методів зворотної розробки, застосованих безпосередньо до натурального судна. Подібні методи існували і раніше, але поява лазерного 3D сканування значно скоротила час та підвищила точність вимірів, роблячи їхнє широке застосування доцільним. Час, необхідний для виконання робіт, тут має критичне значення, оскільки вимірювання координат зовнішньої поверхні корпусу можливе лише під час перебування судна у доці.

До моделі експериментальної установки у [12] є спрощене теоретичне креслення, яке не до кінця розкриває деякі ділянки поверхні корпусу. Зазначимо також, що теоретична поверхня моделі містить суттєві відмінності від поверхні судна-прототипу: спрощена ділянка корми, де на судні розташований гвинто-кермовий комплекс; відсутній кормовий сліп і т. ін., тому документацію судна також не можна взяти за основу. У даних обставинах було вирішено спробувати отримати дані по фактичній зовнішній поверхні корпусу за допомогою лазерного 3D сканування моделі, знятої з установки для сухого зберігання на період літніх канікул. Сканування було проведено одеським підрозділом компанії Navalista за сприяння І.П. Давидова.

Лазерне 3D сканування дозволяє отримати координати масиву точок зовнішньої поверхні моделі. Рекомендована процедура передбачає отримання вимірів з декількох позицій, для чого необхідно переміщувати сканер і повторювати цикл вимірів декілька разів. Це покращує умови сканування поверхень складної форми з урахуванням особливостей освітлення, блисків, затінення

одних частин поверхні іншими. Формування загального масиву точок пізніше виконується у спеціальному програмному забезпеченні за принципами, подібними до формування панорамних знімків з декількох окремих фотографій. Сканування моделі виконувалося в неідеальних, хоча і «лабораторних» умовах: у приміщенні можна було використати сканер невеликого розміру (з не найбільшою точністю); сканування з деяких напрямків не могло проводитися на оптимальних відстанях. Тому отримані точки поверхні мали значний розкид. Відмітимо, що, за умови однакової відносної точності, якщо для натурального судна прийняти допустиме абсолютне відхилення 1 мм (суднобудівний стандарт), то для моделі у масштабі 1:10 ця величина буде вже 0,1 мм. Тому використання технології, цілком прийнятної для натурних суден, в умовах масштабної моделі може бути ускладненим. Тим не менш, в результаті ретельної обробки даних сканування та їх аналізу процес побудови 3D моделі теоретичної поверхні вдалося завершити успішно.

Для побудови теоретичної поверхні може бути використаний спеціалізований або загальномашинобудівний САПР. У даному випадку був використаний ПК FREE!ship Plus (розповсюджується вільно за ліцензією типу General Public License). Остаточний вигляд побудованої 3D моделі теоретичної поверхні представлений на рис. 3.

2.2. Розрахунок кривих елементів теоретичного креслення та пліч остійності форми

Наявність 3D моделі теоретичної поверхні дозволяє виконати розрахунок характеристик зануреного об'єму в одній зі спеціалізованих САПР для проектування суден. У вітчизняній практиці для таких задач традиційно використовувався ПК Проект-1 (радянської розробки чи його більш сучасні модифікації). Геометрія судової поверхні у Проект-1 представляється набором шпангоутних перетинів та лініями штевнів. Принципово можливо готувати координати таких перетинів по 3D моделі теоретичної поверхні.

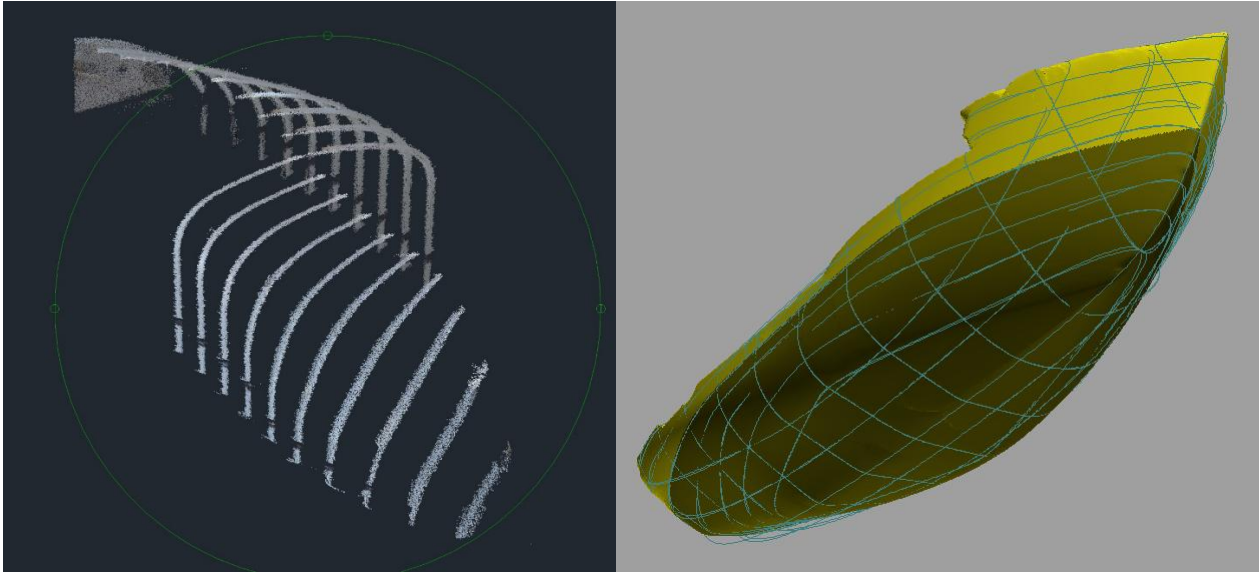


Рис. 3. Точки зовнішньої поверхні моделі за даними лазерного 3D сканування (а) та реконструкція теоретичної поверхні у САПП FREE!ship Plus (б)

Але сучасні ПК, як правило, виконують гідростатичні розрахунки безпосередньо по тривимірній геометрії, що представлена аналітичною (з підтримкою гладких поверхонь) або фасетковою (апроксимованою плоскими гранями-фасетками) моделлю. Це забезпечує більшу зручність та точність. Таким шляхом у ПК FREE!ship Plus було розраховано досить детальну таблицю елементів теоретичного креслення (з кроком по осадці 1 мм), зручну для обробки лабораторних робіт без додаткової інтерполяції. Порівняння розрахункових даних з даними документації [12] виявило їхню близьку подібність – рис. 4. Аналогічним чином було розраховано і таблицю плеч остійності форми (пантокарен), значення яких представлено у графічній формі на рис. 5. Виходячи з того, що для натурних суден зазвичай лінійні розміри вказують з точністю до 1 мм, для моделі вони були представлені з точністю до 0,1 мм (10^{-4} м), площа ватерлінії та об'ємна водотоннажність представлені з точністю до 10^{-5} м² та 10^{-5} м³ відповідно.

Результати виконаних розрахунків пропонуються до використання у лабораторних роботах. Таблиця елементів теоретичного креслення задіяна практично в усіх з них, тому її оновлення сприяє зручності та точності обробки даних. Отримання плеч

остійності форми (пантокарен) дозволяє суттєво вдосконалити лабораторну роботу, присвячену побудові діаграми статичної остійності.

3. Запропоновані зміни у лабораторних роботах

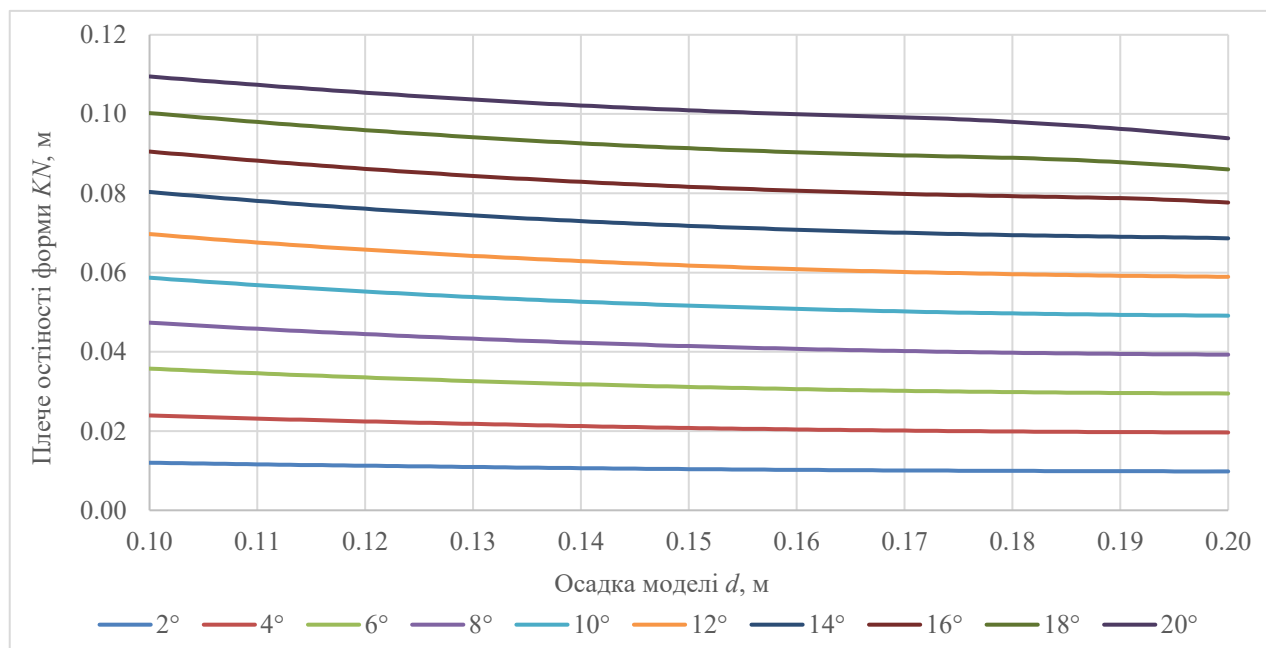
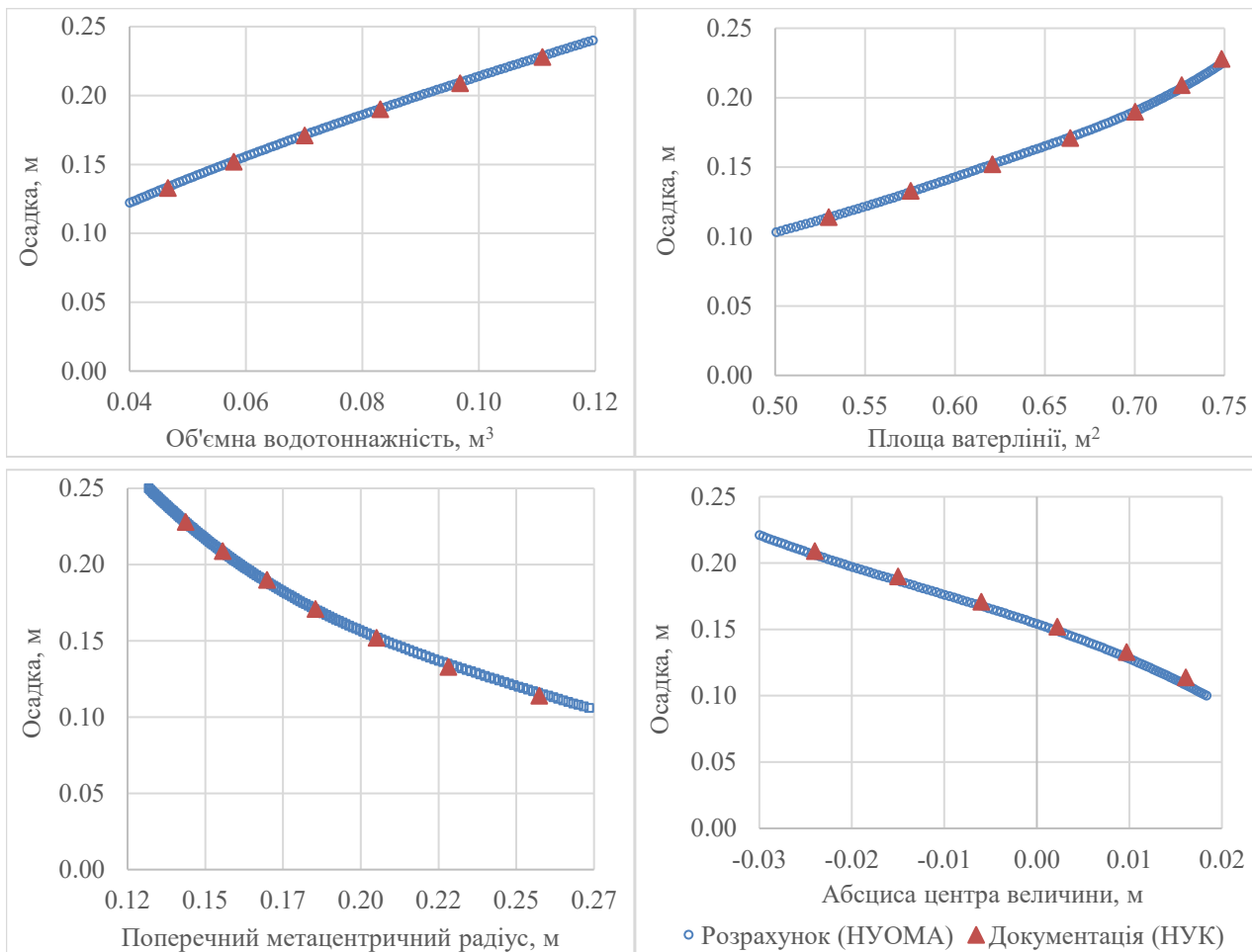
3.1. Розрахункова частина для роботи з діаграмою статичної остійності

У роботі передбачено попереднє визначення метацентричної висоти (МЦВ) та відповідної аплікати центру ваги моделі за допомогою досліду кренування. Після цього виконується експериментальне визначення плеч статичної остійності з використанням системи кренування установки та побудова діаграми статичної остійності (ДСО). МЦВ визначається розрахунково-експериментальним шляхом (з використанням елементів теоретичного креслення). Її побудова на ДСО виконується як залежність плеч остійності за лінійною метацентричною формулою:

$$l = \overline{GM} \phi, \quad (1)$$

де: \overline{GM} – МЦВ моделі у даному стані; ϕ – кут крену.

Така побудова дає можливість перевірити, чи є лінійна залежність (1) дотичною до початкової ділянки ДСО.



У лабораторній роботі за [12] вказана побудова є єдиним, непрямим порівнянням розрахункових і експериментальних результатів. Маючи ж плечі остійності форми (пантокарени), ДСО можна повністю побудувати розрахунковим шляхом за звичайною методикою [11, с. 31], взявши до уваги аплікату центра ваги, отриману через МЦВ, і порівняти розрахункову та експериментальну ДСО між собою.

Для перевірки даних та відпрацювання запропонованої лабораторної роботи відповідні розрахунки та експерименти було виконано при чотирьох різних варіантах навантаження моделі, при яких вона мала однакову посадку, але різні аплікати центра ваги KG . Визначення ординат ДСО у роботі ґрунтується на факті, що в положенні рівноваги моделі під дією пари сил кренувальний момент дорівнює відновлювальному. Тому, при створенні різних кренувальних моментів шляхом підвішування спеціальних вантажів до кренувальної системи, модель займає положення з різними кутами крену, які необхідно фіксувати для побудови ДСО. Таким чином легко побудувати зростаючий сегмент ДСО. Але при кутах крену, більших, ніж кут максимуму, модель знаходиться у нестійкої рівновазі. Для побудови спадаючого сегменту у [12] рекомендується вручну нахилити модель на кут, більший, ніж кут рівноваги, а потім, утримуючи модель від перегортання, повільно випрямляти її до кута, при переході через який вона почне випрямлятися самостійно. Останній кут і буде шуканим кутом нестійкої рівноваги. Однак, кут максимуму ДСО є близьким до кута входу палуби у воду, тому в навчальному процесі НУОМА, як правило, будується тільки зростаючий сегмент діаграми.

Для замірювання кутів крену використовувався транспортір системи кренування зі шкалою ділень $0,5^\circ$. Плечі остійності за формулою (1) також розраховувалися (з використанням оновлених згідно даної статті елементів теоретичного креслення) і наносилися на

діаграми. Отримані результати представлені на рис. 6. Судячи з них, рівень співпадіння є цілком достатнім для навчальних цілей. Відмітимо, що точність розглянутих експериментальних замірів була обмежена використанням транспорту системи кренування. При використанні сенсору кута крену її можна додатково поліпшити.

3.2. Аналіз похибок вимірювань

Оцінка похибки вимірювань традиційно вважається чи не найважливішою частиною навчальних лабораторних робіт. Вона, з одного боку, дає впевненість, що робота виконана правильно та достатньо акуратно, а з іншого – додатково демонструє курсантам адекватність теоретичних розрахунків, на фоні яких, як правило, оцінюються похибки експерименту.

Найпростішим підходом до оцінки похибки є той, де результат експериментального виміру, або засновану на ньому величину, можна безпосередньо порівняти з аналогічною величиною, розрахованою теоретично. В такому випадку абсолютна похибка є різницею між зазначеними величинами. Очевидно, такий підхід має сенс, коли можливий теоретичний розрахунок, цілком незалежний від експериментальних даних. Серед лабораторних робіт, що розглядаються, такий підхід застосовується при дослідженні впливу підвішених та рідких вантажів на початкову остійність. У роботах експериментально визначається поправка до МЦВ внаслідок наявності, відповідно, підвішеного чи рідкого вантажу. Такі ж поправки можна розрахувати теоретично, оскільки усі необхідні для цього параметри відомі. Різниця між поправками розглядається як похибка, що є цілком зрозумілим.

Іншою є ситуація у лабораторній роботі, в якій виконується модельний дослід кренування. Дослід пропонується виконувати шляхом п'яти зміщень крен-баласту, що викликають крени моделі тільки на один (лівий) борт. Така відносно коротка програма є доцільною у навчальному процесі НУОМА з оглядом на чисельність груп і час,

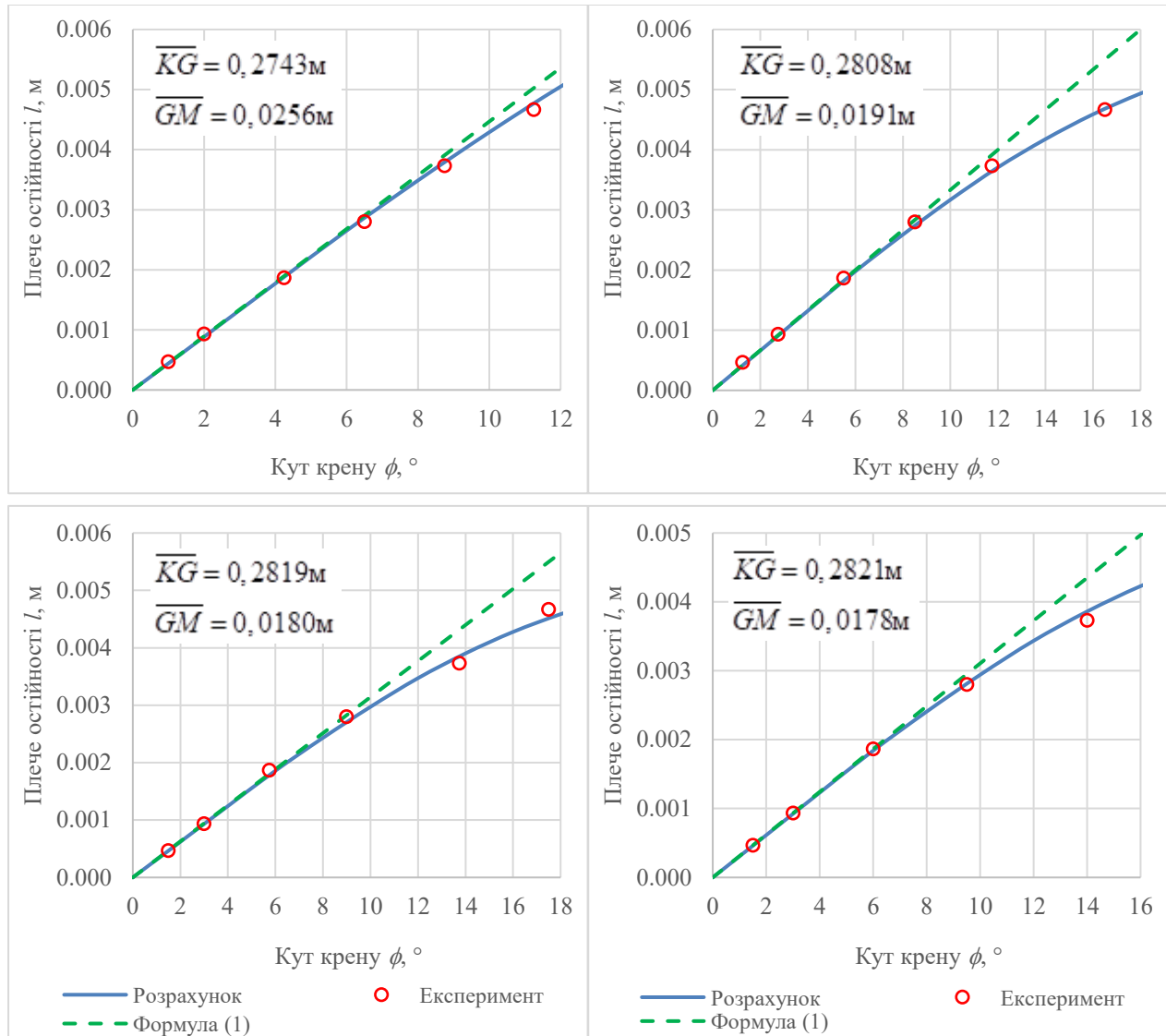


Рис. 6. Діаграми статичної остійності за розрахунками та експериментами

необхідний на виконання роботи. В результаті отримуються дані, приклад яких наведено у таблиці 1.

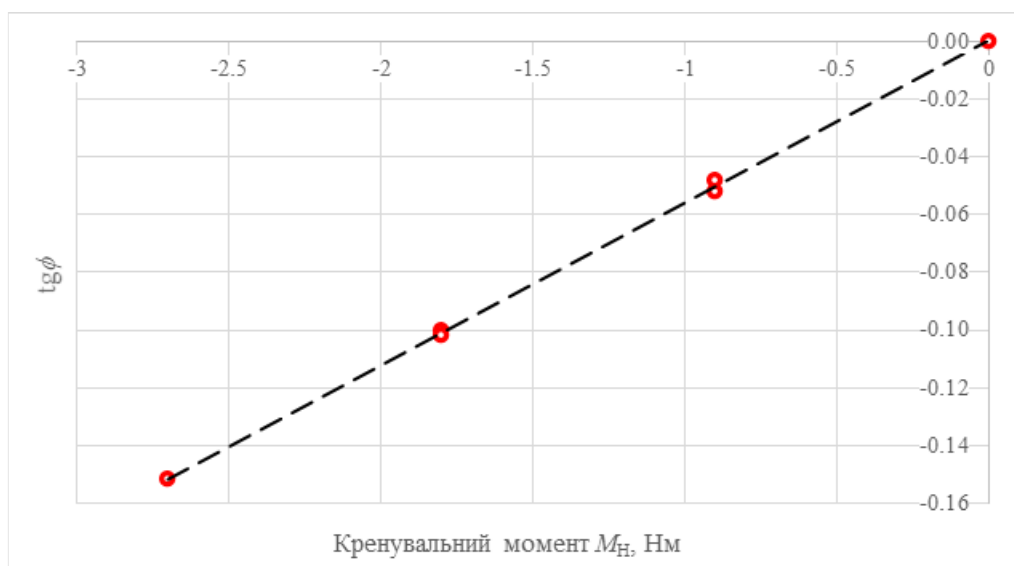
Натурний дослід кренування є важливим інструментом контролю остійності суден після побудови або модернізації, тому методика його проведення, аналіз якості і похибки експерименту регламентуються нормативними документами [13, 14]. Для перевірки якості проведення експерименту [13] рекомендує побудову залежності тангенсу кута крену від величини кренувального моменту, $\text{tg}\phi = f(M_H)$. Якщо дослід виконано якісно, графік такої залежності є прямою лінією, що проходить через початок координат. Помітні відхилення

від лінійності, в залежності від їхнього характеру, вказують на наявність надмірних вільних поверхень рідин, чіпляння судном дна акваторії при кренах або дію поривів вітру. Зміщення від початку координат вказує на дію постійного вітру. В навчальних цілях корисно будувати вказану залежність (рис. 7), тому важливо отримувати точки з декількома різними величинами крену.

Оскільки дослід повторюється декілька разів за одним і тим самим сценарієм, похибку визначення МЦВ можливо оцінити статистичними методами. У [14] запропонований статистичний підхід на основі t -розподілу Стьюдента [15], налаштований на кількість вимірів не менше

Таблиця 1. Основні результати проведення модельного дослідження кренування (приклад)

Найменування характеристики	Номер схеми переміщення крен-баласту				
	1	2	3	4	5
Кренувальний момент (на лівий борт) $M_H, \text{Нм}$	-0,9	-1,8	-2,7	-1,8	-0,9
Кут крену (на лівий борт) $\phi, ^\circ$	-3,0	-5,7	-8,6	-5,8	-2,8
МЦВ $\overline{GM}_i, \text{м}$	0,0331	0,0344	0,0339	0,0337	0,0357
Відхилення МЦВ від середнього значення $\overline{GM}_i - \overline{GM}, \text{м}$	-0,0010	0,0002	-0,0002	-0,0004	0,0015

Рис. 7. Побудова залежності $\text{tg}\phi = f(M_H)$ за даними дослідження кренування (приклад)

восьми. На наш погляд, такі вимоги спрямовані на забезпечення низької похибки з оглядом на практичне значення дослідження. Якщо ж оцінювати фактичну похибку у навчальних цілях, то можна використовувати подібний підхід і з меншим числом вимірів. Але важливою умовою є випадковий характер даних. Навіть коли спосіб отримання даних за своєю природою і є випадковим, це надійно відображається лише у великих вибірках. Крім того, результати вимірів можуть мати систематичну похибку (наприклад, внаслідок некоректного проведення експерименту). Якщо ж вибірка похибок не має властивостей випадкової послідовності, статистична оцінка може бути

в окремо взятій лабораторній роботі некоректною.

В цьому контексті показник випадковості застосовується наступним чином. Вибіркою є послідовність позитивних чисел a_1, a_2, \dots, a_k . Відомий параметр стохастичності для неї дорівнює

$$B = a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_k^2. \quad (2)$$

Позначивши суму всіх членів вибірки як n , найменше значення параметру (2) можна розрахувати за формулою:

$$B_0 = k \left(\frac{n}{k} \right)^2 = \frac{n^2}{k}. \quad (3)$$

Недоліком параметру B є його розмірність, тобто його величина залежить від

абсолютних значень членів вибірки. Для порівняння вибірок незалежно від масштабу їхніх значень доцільно перейти до нормованого безрозмірного показника, поділивши B на його мінімальне значення B_0 . Позначимо цей показник через β :

$$\beta = B/B_0. \quad (4)$$

З формули (4) зрозуміло, що $\beta \geq 1$. Середнє значення β^* можна розрахувати таким чином:

$$\beta^* = 2k/(k+1). \quad (5)$$

Значення β^* за формулою (5) наближається до 2 при зростанні розміру вибірки k . Значення $\beta < \beta^*$ вказують на тенденцію до малої різниці між числами вибірки, до вирівнювання. Гранично-низьким значенням є $\beta = 1$ при $a_i = n/k$. Значення $\beta > \beta^*$ вказують на тенденцію до скупчення (кластеризації) членів вибірки. Верхньою теоретичною границею буде $\beta = k$, коли всі члени вибірки нульові. Таким чином, параметр β може служити критерієм випадковості вибірки, незалежно від способу отримання чисел, беручи до уваги тільки їхні значення. Як мала різниця між числами, так і кластеризація вказують на закономірність. Для випадкових вибірок β приймає значення, близькі до β^* . Оскільки різні практичні ситуації можуть мати свої особливості (містити як випадкові, так і закономірні складові) параметр β можна використовувати, порівнюючи відносний ступень випадковості кількох вибірок.

Для перевірки ступеня випадковості похибки вимірювань у таблиці 1 застосуємо наведений вище показник β до абсолютних значень відхилень МЦВ від її середнього значення. Згідно з результатами розрахунків за формулами (2-5), $\beta = 1,571$; $\beta^* = 1,667$. Тобто, показник β є значно ближчим до середнього значення, ніж до граничних, що вказує на випадковий характер вибірки. Для порівняння автори отримали три вибірки з п'яти чисел за допомогою функції RAND (генератор випадкових чисел) ПК Excel, для

яких значення критерію β виявилися рівними 1,183; 1,511; 1,061.

Границя довірчого інтервалу за t -розподілом Стьюдента [15] відстоїть від середнього значення на величину:

$$\varepsilon = t_\alpha \sigma / \sqrt{n}, \quad (6)$$

де: σ – середньоквадратичне відхилення (СКВ); t_α – вибране значення розподілу для заданого розміру вибірки (ступеня свободи) і інтервалу певності.

При розрахунку за формулою (6) пропонується спочатку розрахувати СКВ та, за необхідності, відкинути точки, що відхиляються від середнього значення більше ніж на 2σ . Розрахунок за формулою (6) виконується вже по скорегованій виборці для інтервалу певності 99,95%. Остаточна експериментальна оцінка МЦВ фіксується як середнє значення з відхиленням $\pm \varepsilon$. Таким чином, пропонується статистична оцінка похибки вимірювань з додатковим розрахунком критерію (4) для індикації особливостей малої вибірки, що можуть позначатися на результатах оцінки (індикація призначена для викладача).

Інший підхід пропонується у лабораторній роботі з експериментального визначення ДСО, розрахункова частина якої розглянута вище у даній статті. Як зазначено, важливою перевагою наявності розрахункової частини є можливість порівняння розрахункових та експериментальних даних, виявлення розбіжностей між ними. У практичних ситуаціях, як правило, похибкою вважається відхилення параметрів, що спостерігаються, від розрахункових. Розрахунки, строго кажучи, теж мають певну невизначеність, але в судовій документації вона не фігурує, тобто результати розрахунків вважаються практично точними. Притримуючись схожого підходу, автори пропонують визначити деякий діапазон допустимих відхилень, відмірений від розрахункових значень. Прийнятність похибок можна оцінювати по тому, чи вкладаються експериментальні точки у даний діапазон.

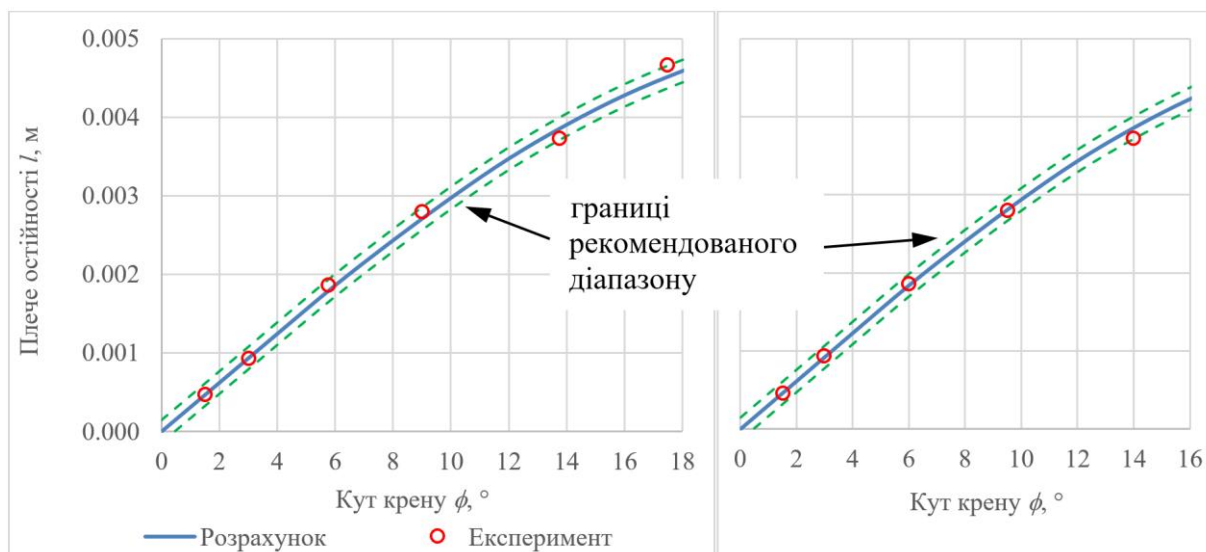


Рис. 8. Візуальна оцінка похибок вимірювань за допомогою діапазону відхилень

Для обґрунтування загального (для всіх лабораторних робіт) діапазону допустимих відхилень були використані дані, отримані при чотирьох різних варіантах навантаження моделі, представлені вище на рис. 6. Для цього по всіх експериментальних точках (яких в сумі двадцять три) були обчислені відхилення від відповідних розрахункових плеч статичної остійності. Випадковий характер отриманої вибірки (абсолютних значень відхилень) був додатково перевірений за критерієм (4). Згідно до результатів перевірки, $\beta = 1,702$; $\beta^* = 1,917$. Для порівняння, функція RAND ПК Excel дала три вибірки такого ж розміру з $\beta = 1,302$; $1,360$; $1,288$. Таким чином, вибірку можна охарактеризувати як випадкову. СКВ по ній складає $\sigma = 0,720 \cdot 10^{-4}$ м. Границі діапазону допустимих відхилень можна рекомендувати встановити на відстані $\pm 2\sigma = \pm 1,439 \cdot 10^{-4}$ м від розрахункових значень – рис. 8. Невихід експериментальних точок за межі діапазону у майбутніх лабораторних роботах вказуватиме, що похибки вимірювань не перевищують той рівень, що мав місце при підготовці даної статті.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Представлені результати показали, що методологічна база лабораторного

практикуму може бути суттєво вдосконалена без змін експериментальної установки, за рахунок підготовки розширених даних для обробки та аналізу результатів дослідів. Такі дані були отримані зі застосуванням сучасних технологій автоматичного лазерного сканування та 3D моделювання.

Отримані дані пропонується використовувати у навчальному процесі. Серед них, елементи теоретичного креслення, розраховані з малим кроком, сприяють зручності та точності виконання усіх лабораторних робіт. Розрахунок плеч остійності форми (пантакарен), значення яких не входили до наявної документації установки, дозволив суттєво вдосконалити лабораторну роботу, присвячену побудові діаграми статичної остійності. У статті запропонована відповідна розрахункова частина роботи. Крім того, виконано аналіз задіяних методів оцінки похибок вимірювань і запропоновано вдосконалення деяких з них.

Подальші роботи за даним напрямком можуть включати: розробку математичної моделі експериментальної установки і відповідного програмного забезпечення для можливості виконання віртуальних лабораторних робіт; вдосконалення інших лабораторних робіт до розглянутої установки, зокрема, з непотоплюваності та хитавиці судна.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Lee D.-K., Park B.-Y., “A case study for 3D scanning-based quantitative quality control during key stages of composite small craft production”, *Int. journal of naval architecture and ocean engineering*, No. 15, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2023.100534, 2023.
- [2] Deja M., Dobrzyński M., Rymkiewicz M., “Application of reverse engineering technology in part design for shipbuilding industry”, *Polish maritime research*, No. 2 (102), doi: 10.2478/pomr-2019-0032, pp. 126-133, 2019.
- [3] Pechenyuk A.V., “The method of optimum foreship transformation in the problem of total resistance decreasing in the still water”, *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, No. 2, doi: 10.15589/jnn20160206, pp. 40-45, 2016.
- [4] Hordiienko O.L., Pechenyuk A.V., “Development of propulsion solutions for river-sea ships of the northern Black Sea”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, No. 238 (2), doi: 10.1177/14750902231203443, pp. 325-335, 2024.
- [5] Власенко Є.А., Печенюк А.В., Стецюк Т.Г., “Концепт суховантажного судна для гирлових ділянок європейських річок на основі вітчизняного досвіду проектування суден обмеженого району плавання”, *Судноводіння*, № 37, doi: 10.31653/2306-5761.37.2025.127-143, с. 127-143, 2025.
- [6] Дулгеру М.І., Печенюк А.В., “Підготовка даних для вдосконалення лабораторної роботи з експериментального визначення діаграми статичної остійності судна”, *У мат. наук.-техн. конф. НУОМА “Судноводіння, морські перевезення та технології” NST-2025*, с. 74–78, '11, 2025.
- [7] Mironiuk W., Łosiewicz Z., “Experimental Studies of Pitching Training Ship model in terms of maritime transport security”, *Logistyka*, No. 6, pp. 7531-7539, 2014.
- [8] Armfield, “NA8 Ships Stability Apparatus Datasheet”, *Armfield*, 2019. [Online]. Available: <https://armfield.co.uk/wp-content/uploads/2019/10/NA8-DataSheet-v1aWeb.pdf>. [Accessed: Feb. 15, 2026].
- [9] Kvaerner Masa Marine, “U.S. Coast Guard interactive stability trainer: Operator’s manual for the “S.S. Spade”,” *United States Coast Guard*, Project 343, 1998. [Online]. Available: <https://www.fishsafewest.info/PDFs/StabilityModel.pdf>. [Accessed: Feb. 15, 2026].
- [10] Gow M., *Archimedes: mathematical genius of the ancient world*. Berkeley Heights, NJ : Enslow Publishers, 2005.
- [11] Бурмака І.О., Давидов І.П., Король А.Я., Кучер Ю.П., Теорія та будова судна. Складання вантажного плану. Перевірка остійності й міцності: методичні вказівки для виконання курсової роботи, Одеса: НУОМА, 2021.
- [12] Некрасов В.О. Збірник лабораторних робіт з дослідження плавучості, остійності та непотоплюваності судна на тихій воді. Миколаїв: НУК, 2007.
- [13] International Maritime organization, *International code on intact stability*, 2008 (2008 IS code). London: IMO, 2020.
- [14] Регістр Судноплавства України, *Правила класифікації та побудови морських суден. Том 2*, Київ: Регістр Судноплавства України, 2020.
- [15] Lange K.L., Little R.J.A., Taylor J.M.G., “Robust Statistical Modeling Using the t Distribution”, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 84, Issue 408, doi: 10.1080/01621459.1989.10478852, pp. 881-896, 1989.

REFERENCES

- [1] Lee D.-K. and Park B.-Y., “A case study for 3D scanning-based quantitative quality control during key stages of composite small craft production”, *Int. journal of naval architecture and ocean engineering*, No. 15, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2023.100534, 2023.
- [2] Deja M., Dobrzyński M., Rymkiewicz M., “Application of reverse engineering technology in part design for shipbuilding industry”, *Polish maritime research*, No. 2 (102), doi: 10.2478/pomr-2019-0032, pp. 126-133, 2019.
- [3] Pechenyuk A.V., “The method of optimum foreship transformation in the problem of total resistance decreasing in the still water”, *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, No. 2, doi: 10.15589/jnn20160206, pp. 40-45, 2016.
- [4] Hordiienko O.L., Pechenyuk A.V., “Development of propulsion solutions for river-sea ships of the northern Black Sea”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, No. 238 (2), doi: 10.1177/14750902231203443, pp. 325-335, 2024.
- [5] Vlasenko Y., Pechenyuk A., Stetsiuk T., “A concept of dry-cargo vessel for estuaries of european rivers based on national experience in designing ships of restricted navigation area”, *Shipping & Navigation*, No. 37, doi: 10.31653/2306-5761.37.2025.127-143, pp. 127-143, 2025.
- [6] Dulgheru M.I., Pechenyuk A.V., “Pidhotovka danykh dlia vdoskonalennia laboratornoi roboty z eksperymentalnoho vyznachennia diahramy statychnoi ostiinosti sudna”, In *Proc. of scient. and tech. conf. of NUOMA “Navigation, shipping and technology” NST-2025*, pp. 74–78, '11, 2025.
- [7] Mironiuk W., Łosiewicz Z., “Experimental Studies of Pitching Training Ship model in terms of maritime transport security”, *Logistyka*, No. 6, pp. 7531-7539, 2014.
- [8] Armfield, “NA8 Ships Stability Apparatus Datasheet”, *Armfield*, 2019. [Online]. Available: <https://armfield.co.uk/wp-content/uploads/2019/10/NA8-DataSheet-v1aWeb.pdf> [Accessed: Feb. 15, 2026].
- [9] Kvaerner Masa Marine, “U.S. Coast Guard interactive stability trainer: Operator’s manual for the “S.S. Spade”,” *United States Coast Guard*, Project 343, 1998. [Online]. Available: <https://www.fishsafewest.info/PDFs/StabilityModel.pdf>. [Accessed: Feb. 15, 2026].
- [10] Gow M., *Archimedes: mathematical genius of the ancient world*. Berkeley Heights, NJ: Enslow Publishers, 2005.
- [11] Burmaka I.O., Davydov I.P., Korol A.Ia., Kucher Yu.P., Teoriia ta budova sudna. Skladan-nia vantazhnoho planu. Pervirka ostiinosti y mitsnosti: metodychni vkazivky dlia vykonannia kursovoi roboty, Odesa: NUOMA, 2021.
- [12] Nekrasov V.O. Zbirnyk laboratornykh robit z doslidzhennia plavuchosti, ostiinosti ta nepotopliuvanosti sudna na tykhii vodi, Mykolaiv: NUOS, 2007.
- [13] International Maritime organization, International code on intact stability, 2008 (2008 IS code). London: IMO, 2020.
- [14] Shipping Register of Ukraine, *Rules for the classification and construction of sea-going ships. Vol. 2*, Kyiv: Shipping Register of Ukraine, 2020.
- [15] Lange K.L., Little R.J.A., Taylor J.M.G., “Robust Statistical Modeling Using the t Distribution”, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 84, Issue 408, doi: 10.1080/01621459.1989.10478852, pp. 881-896, 1989.