

УДК 629.544:627.74
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).4](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).4)

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS AND SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE MAIN ELEMENTS OF NON-SELF-PROPELLED PONTOON DREDGERS

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ГОЛОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НЕСАМОХІДНИХ ПОНТОННИХ ЗЕМСНАРЯДІВ

Vladyslav V. Sotsenko¹

sotsenko.vladyslav@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1215-849X

Oleksandr V. Shchedrolosiev²

oleksandr.shchedrolosiev@nuos.edu.ua

mailto:oleksandr.shchedrolosiev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7972-3882

В. В. Соценко¹,

старший викладач

О. В. Щедролосоєв²,

докт. техн. наук, професор

Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Херсон

Abstract. Future research directions regarding the refinement of the methodology for calculating the main elements and mass loads for non-self-propelled pontoon dredgers are proposed. To evaluate the adequacy of the developed regression models, using the example of a statistical database of 40 modern dredger projects from leading global manufacturers (“Damen”, “IHC”, “Ellicott”), corresponding verification calculations were performed.

Analysis of the research results indicates that when calculating the main dimensions of non-self-propelled dredgers with collapsible pontoon structures, it is impossible to obtain correct design results without accounting for strict logistical constraints for land transportation. In particular, it was established that the dimensions of the main pontoon must be adapted to road transport standards (length up to 13.20 m), which directly affects the choice of the $(LBH)^2$ module when calculating mass loads.

Purpose. The study is aimed at solving an urgent scientific and practical task – developing a methodology for the approximate determination of the main elements and mass characteristics of non-self-propelled pontoon dredgers at the initial stages of design. The main goal is to establish mathematical dependencies between operational parameters (dredging depth, power) and the structural characteristics of the vessel to increase the accuracy of design decisions in the context of the urgent need to modernize the dredging fleet of Ukraine.

Methodology. The research is based on a comprehensive approach that combines methods of statistical analysis, ship design theory, and correlation-regression modeling. To form the research database, technical data from 40 modern dredger projects by leading global brands (“Damen”, “IHC”, “Ellicott”) and the domestic manufacturer “VUV-SPETSTEKHNIKA” were processed. The author applied the approximation method to find functional relationships between the main dimensions (L , B , D , d) and the primary characteristics of the technical assignment. The adequacy of the obtained models was verified using the Fisher criterion and the analysis of relative calculation errors compared with the actual data of existing vessels.

Results. A profound analysis of the state of the dredging fleet was conducted, revealing a critical level of obsolescence (over 63 % of vessels are older than 30 years). A system of regression equations was obtained, allowing for the determination of the length, width, and draft of pontoon dredgers at the preliminary design stage. It was established that the most accurate module for calculating the mass displacement of the hull and equipment is the $(LBH)^2$ indicator. It was proved that dividing the vessel’s length into functional zones (engine room pontoons, afterpeak pontoons) allows for considering the influence of the power unit’s mass and the dredging depth as independent factors. Testing the methodology on real objects showed that the error in determining the lightship displacement does not exceed 10.69 %.

Scientific novelty. For the first time, specific dependencies for non-self-propelled pontoon-type dredgers were substantiated and mathematically described, taking into account their modular design and dimensions’ limitations for land transportation. Unlike existing general ship methodologies, the proposed approach is based on the use of specialized regression modules that account for the non-linear nature of mass changes in dredging pumps and electrical

equipment depending on the vessel's power capacity. The method of weight coefficients for determining mass loads for technical fleet vessels with a large amount of variable equipment was further developed.

Practical implications. The developed methodology allows shipbuilding enterprises and design bureaus to significantly (by 20–30 %) reduce the time required for preliminary design developments and the preparation of commercial proposals. The obtained formulas can be integrated into computer-aided design (CAD) systems for rapid optimization of the vessel's main dimensions. The application of the research results will contribute to the creation of competitive domestic dredgers adapted to logistics requirements (possibility of road transport) and modern environmental standards, which is critical for the restoration of water infrastructure and inland waterways.

Key words: dredger; dredging fleet; ship design; pontoon hull; mass loading; regression analysis; main measurements.

Анотація. Запропоновано напрями подальших досліджень щодо уточнення методики розрахунку головних елементів та навантаження мас для несамохідних понтонних земснарядів. З метою оцінки адекватності розроблених регресійних моделей на прикладі статистичної бази з 40 проектів сучасних земснарядів провідних світових виробників («Damen», «ІНС», «Ellicott»), проведено відповідні перевірочні розрахунки.

Аналіз результатів дослідження показує, що при розрахунках головних розмірів несамохідних земснарядів із розбірними понтонними конструкціями неможливо отримати коректні результати без урахування жорстких логістичних обмежень щодо наземного транспортування. Зокрема, встановлено, що габарити основного понтона мають бути адаптовані під стандарти перевезення автотранспортом (довжина до 13,20 м), що безпосередньо впливає на вибір модуля $(LBH)^2$ при розрахунку навантаження мас.

Мета. Робота спрямована на розв'язання актуальної науково-практичної задачі – розроблення методики наближеного визначення головних елементів та масових характеристик несамохідних понтонних земснарядів на початкових етапах проектування. Основною ціллю є встановлення математичних залежностей між експлуатаційними параметрами (глибина розробки, потужність) та конструктивними характеристиками судна для підвищення точності проектних рішень в умовах необхідності оперативного оновлення днопоглиблювального флоту України.

Методика. В основі дослідження лежить комплексний підхід, що поєднує методи статистичного аналізу, теорію проектування суден та кореляційно-регресійне моделювання. Для формування бази дослідження було опрацьовано технічні дані 40 сучасних проектів земснарядів провідних світових брендів («Damen», «ІНС», «Ellicott») та вітчизняного виробника «ВВВ-СПЕЦТЕХНІКА». Автором застосовано метод апроксимації для знаходження функціональних зв'язків між головними розмірностями (L , B , D , d) та основними характеристиками технічного завдання. Перевірка адекватності отриманих моделей здійснювалася за допомогою критерію Фішера та аналізу відносних похибок розрахунків у порівнянні з фактичними даними побудованих суден.

Результати. Проведено глибокий аналіз стану днопоглиблювального флоту, який виявив критичний рівень зносу (понад 63 % суден старші 30 років). Отримано систему регресійних рівнянь, що дозволяють на етапі ескізного проектування визначати довжину, ширину та осадку понтонних земснарядів. Встановлено, що найбільш точним модулем для розрахунку вимірювача маси корпусу та обладнання є показник $(LBH)^2$. Доведено, що розчленування довжини судна на функціональні зони (понтони моторного відділу, ахтерпикові понтони) дозволяє врахувати вплив маси енергетичної установки та глибини розробки як незалежних факторів. Апробація методики на реальних об'єктах показала, що похибка визначення водотоннажності порожнем не перевищує 10,69 %.

Наукова новизна. Вперше обґрунтовано та математично описано специфічні залежності для несамохідних земснарядів понтонного типу, що враховують їхню модульну конструкцію та обмеження за габаритами транспортування. На відміну від існуючих загальносуднових методик, запропонований підхід базується на використанні спеціалізованих регресійних модулів, які враховують нелінійний характер зміни мас ґрунтонасосного та електротехнічного обладнання залежно від енергоозброєності судна. Подальшого розвитку набув метод вагових коефіцієнтів при визначенні навантаження мас для суден технічного флоту з великою кількістю змінного обладнання.

Практична значимість. Розроблена методика дозволяє суднобудівним підприємствам та проектним бюро суттєво (на 20–30 %) скоротити час на виконання передпроектних розробок та підготовку комерційних пропозицій. Отримані формули можуть бути інтегровані в системи автоматизованого проектування (САПР) для швидкої оптимізації головних розмірів судна. Використання результатів дослідження сприятиме створенню конкурентоспроможних вітчизняних земснарядів, адаптованих до вимог логістики (можливість перевезення автотранспортом) та сучасних екологічних стандартів, що є критично важливим для відновлення водної інфраструктури та внутрішніх водних шляхів.

Ключові слова: земснаряд; днопоглиблювальний флот; проектування суден; понтонний корпус; навантаження мас; регресійний аналіз; головні розмірення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Критичний рівень зносу вітчизняного днопоглиблювального флоту, де понад 63 % суден мають термін експлуатації більше 30 років, суттєво знижує економічну ефективність виконання гідротехнічних робіт. Використання застарілих земснарядів радянської побудови призводить до надмірних витрат палива, частих виходів з ладу та низької надійності, що в умовах ринкової конкуренції робить їх експлуатацію недоцільною.

Крім того, проектування та будівництво нових несамохідних земснарядів вимагає врахування жорстких логістичних обмежень. Необхідність транспортування суден наземним транспортом без спеціального супроводу обмежує габарити основних понтонів (довжина до 13,20 м, ширина до 3,50 м), що вимагає впровадження складних розбірних конструкцій. Це висуває високі вимоги до точності визначення головних розмірів ще на початкових етапах проектування.

Застосування стандартних проектних методик без врахування специфіки понтонних корпусів та сучасного ґрунтонасосного обладнання може призвести до значних похибок у розрахунках навантаження мас. Використання традиційних підходів до оцінки маси корпусу та енергетичної установки без аналізу кореляційних зв'язків із потужністю та глибиною розробки часто виявляється нераціональним.

Таким чином, розробка наближених методів визначення головних елементів та масових характеристик є критично необхідною для комерційного суднобудування. Це дозволить оперативно оцінювати проектні рішення, виходячи з технічного завдання на продуктивність та глибину розробки ґрунту.

Це необхідно врахувати при розробці методики проектування несамохідних понтонних земснарядів для потреб внутрішніх водних шляхів України, та проаналізувати різні математичні моделі на основі статистичних даних сучасних світових лідерів («Damen», «IHC», «Ellicott») та вітчизняного досвіду підприємства «BBV-СПЕЦТЕХНІКА».

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ.

Аналіз наукових праць у галузі проектування технічного флоту свідчить про зміщення фокусу досліджень у бік автоматизації та екологічної безпеки днопоглиблювальних робіт. Питаннями архітектурно-конструктивних типів та теорії проектування земснарядів займалися такі провідні вчені, як В. Й. Власблом (W. J. Vlasblom) [1], який детально описав процеси різання та транспортування ґрунту в контексті проектування фрезерних земснарядів (CSD). Вагомий внесок у розробку методів визначення головних розмірів суден на ранніх стадіях проектування за допомогою регресійного аналізу зробив А. Папаніколау

(А. Papanikolaou) [2], чії методики є базовими для сучасного суднобудування.

Проблематика модернізації днопоглиблювального флоту в Україні та аналіз його технічного стану висвітлювалися в роботах вітчизняних фахівців, зокрема при аналізі перспектив розвитку морських портів [3]. Дослідження компанії ІНС Merwede [4] підтверджують, що сучасне проектування земснарядів базується на використанні статистичних баз даних та імітаційного моделювання для прогнозування продуктивності. Водночас, як зазначають експерти Міжнародної асоціації днопоглиблювальних компаній (IADC) [5], актуальним трендом є модульність конструкцій, що дозволяє транспортувати несамохідні земснаряди до закритих водойм, що і стало об'єктом дослідження в даній статті. Проте, незважаючи на наявні напрацювання, питання точного визначення масових характеристик саме для несамохідних понтонних земснарядів з використанням специфічних регресійних модулів потребує подальшого уточнення.

Метою досліджень є проведення аналізу архітектурно-конструктивних типів земснарядів та розробка математичного апарату (регресійних моделей) для визначення головних розмірів і мас судна на початкових стадіях проектування для підвищення точності проектних рішень.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Застосовано методи теорії і проектування суден, системного аналізу, математичної статистики та кореляційно-регресійного аналізу. Використано методи апроксимації для встановлення функціональних зв'язків між головними розмірностями судна та його ключовими експлуатаційними характеристиками – глибиною розробки та потужністю енергетичної установки. Оцінка значущості отриманих моделей проводилася за допомогою критерію Фішера та аналізу відносних похибок розрахунків порівняно з фактичними даними побудованих суден.

Об'єкт – несамохідні понтонні земснаряди з фрезерним або водяним розпушувачем, призначені для виконання днопоглиблювальних робіт.

Предмет – особливості методики наближеного визначення оптимальних головних елементів та характеристик навантаження мас несамохідного понтонного земснаряда на початкових етапах його проектування.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Днопоглиблювальний флот України можна оцінювати по двом показникам – кількісному та якісному. По кількісному показнику в Україні на 2020 рік налічує 46 земснарядів, які знаходяться в державній та приватній формі власності.

Якісний показник – це розподіл днопоглиблювального флоту за віком, дозволяє зробити висновок

про необхідність заміни застарілих суден більш ефективними і прибутковими новими земснарядами. В таблиці 1 наведені дані про склад днопоглиблювального флоту України за віком.

Таблиця 1. Розподіл днопоглиблювального флоту України за віком

Вік	Кількість земснарядів, од	Відсоток, %
До 5 років	3	6,52
5 – 10 років	5	10,86
11 – 20 років	5	10,86
21 – 30 років	4	8,69
31 – 40 років	19	41,32
Більше 40 років	10	21,75

Аналіз даних таблиці 1 дозволяє зробити висновок про те, що тільки 8 земснарядів мають термін експлуатації до 10 років. Це судна, які можна вважати новими, але вони складають лише 17,38 % від загальної кількості земснарядів. Старші 30 років – 29 земснарядів (63 % від загальної кількості), 10 земснарядів мають термін експлуатації більше 40 років (21,75 % від загальної кількості). Більшість цих суден була побудована ще за часи Радянського Союзу і застаріла як в моральному, так і технічному плані.

Аналіз проектних характеристик світових і вітчизняних земснарядів

Основою для аналізу послужили статистичні дані по несамохідним земснарядам понтонного типу, представлених моделей на суднобудівних підприємствах світових лідерів. В статті розглядаються земснаряди, які мають фрезерний або водяний розпушувач. На рис. 1 представлений земснаряд з фрезерним розпушувачем.

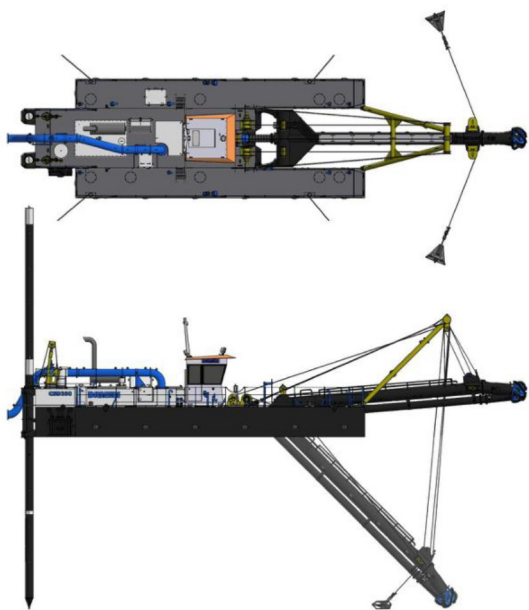


Рис. 1. Фрезерний земснаряд фірми «Damen»

Сучасні найбільш відомі іноземні виробники несамохідних земснарядів понтонного типу – «Damen» (Нідерланди), «ІНС» (Нідерланди), «Ellicott» (США). Серед вітчизняних виробників – «НСС».

Несамохідний земснаряд понтонного типу, має декілька основних архітектурно-конструктивних особливостей. Корпус судна має розбірну конструкцію, складається з основного понтона (насосне відділення) та пристяжних понтонів кількістю 2 та більше, які міцно з'єднанні між собою болтами або пальцями. Зазвичай розміри насосного відділення не перевищують по довжині 15,00 м, ширини 4,50 м та висоті 3,00 м, для перевезення на відкритому тралі тягача, з супроводом поліції. Або довжини 13,20 м, ширини 3,50 м, та висоті 2,75 м, без супроводу поліції. Пристяжні понтони зазвичай мають розміри не більше 13,20 м довжини, 2,40 м ширини та 2,40 м висоти, для перевезення на стандартному тентовому тягачі.

Так як, земснаряд несамохідний, вони мають на борту, від 2 до 4 лебідок позиціонування. Перший вид позиціонування судна на воді, завдяки 4 лебідкам та 4 якорям, другий вид позиціонування завдяки 2 лебідкам з якорями, та 2 паль на кормі судна.

Аналізуючи основні характеристики представлених моделей існуючих несамохідних понтонних земснарядів можна бачити, що їх головні розміри знаходяться в достатньо вузьких межах порівняно між собою. Довжина їх становить від 11,50 до 44,00 м – Damen, від 12,00 до 43,50 м – ІНС, від 11,00 до 34,60 м – Ellicott, від 11,50 до 42,00 м – НСС. Ширина їх становить від 4,20 до 10,50 м – Damen, від 4,50 до 12,44 м – ІНС, від 3,66 до 9,20 м – Ellicott, від 4,50 до 9,50 м – НСС. Висота борта їх становить від 1,50 до 2,80 м – Damen, від 1,35 до 2,97 м – ІНС, від 1,22 до 2,44 м – Ellicott, від 1,25 до 2,97 м – НСС.

Обробка даних геометричних характеристик 40 моделей несамохідних понтонних земснарядів, дозволили отримати залежності головних розмірів, потужності енергетичної установки, глибини розробки.

Довжину судна між перпендикулярами L_{pp} , треба розкласти на три основні складові, так як довжина понтонів до моторного відділу, залежить від довжини всмоктуючого пульпопроводу, тобто глибини розробки. Друга складова, яка входить в загальну довжину, це довжина моторного відділу (насосного відділення), яка залежить від встановленого насоса та головного двигуна, тобто від продуктивності та потужності. Третя складова виникає, при великій довжині моторного відділу. Чим більша потужність силового агрегату, тим більша його маса та розміри, а отже виникає потреба встановлення додаткових ахтерпикових понтонів, для противаги та покращення характеристик мореплавності судна.

На рис. 2 представлена залежність довжини до моторного відділення (насосне відділення) L_p несамохідних земснарядів від глибини розробки D_d .

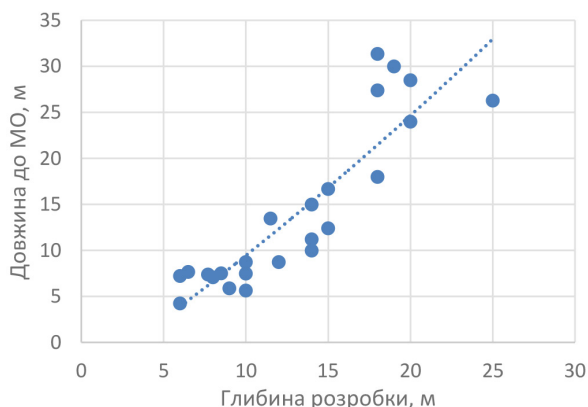


Рис. 2. Залежність довжини до моторного відділення від глибини розробки

Довжина понтонів до моторного відділення L_p , на пряму залежать від довжини всмоктуючого пульпопроводу, а отже від глибини розробки Dd . Як ми бачимо при глибині розробки 5–10 м, довжина понтонів до моторного відділення 5–10 м, при збільшенні глибини розробки, збільшується пропорційно і довжина.

Довжина моторного відділу L_{mv} , залежить в більшому ступені від потужності головного двигуна, так як чим продуктивніший встановлений ґрунтовий насос, тим більша потужність йому потрібна для стабільної роботи. На Рис. 3. представлена залежність довжини моторного відділу L_{mv} від потужності головного двигуна N_e .

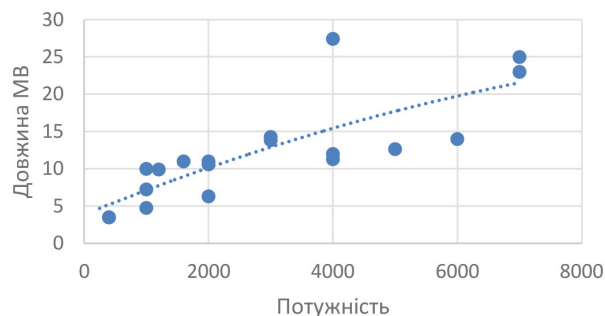


Рис. 3. Залежність довжини моторного відділу від потужності головного двигуна

На рисунку 4 представлена залежність довжини ахтерпикового понтону L_{ax} від довжини моторного відсіку L_{mv} .

Ширина B має для несамохідних понтонних земснарядів має важливу роль, так як суттєво впливає на остійність судна. Від величини відношення довжини судна до ширини, залежить зручність розміщення рубки, ходових лебідок, паль, насосної установки та інших приміщень. На рис. 5 представлені залежності ширини B земснаряда від довжини між перпендикулярами L_{pp} .

Відношення ширини B до осадки d характеризує остійність судна. Під час роботи на хвилюванні, земснаряд має чітко позиціюватися, не тільки для безперервної роботи, а й захисту від пошкодження рами всмоктуючого пристрою.

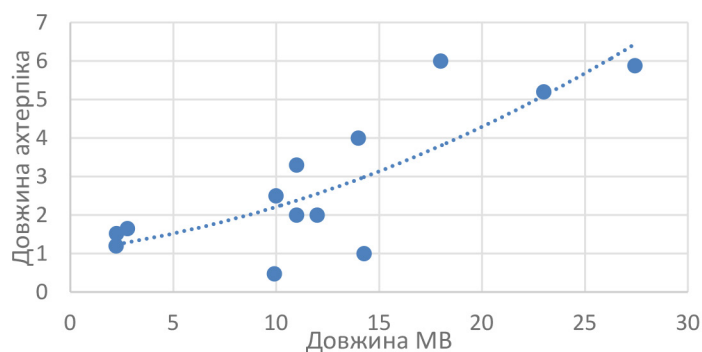


Рис. 4. Залежність довжини ахтерпикових понтонів від довжини моторного відділу



Рис. 5. Залежність ширини земснаряда від довжини між перпендикулярами

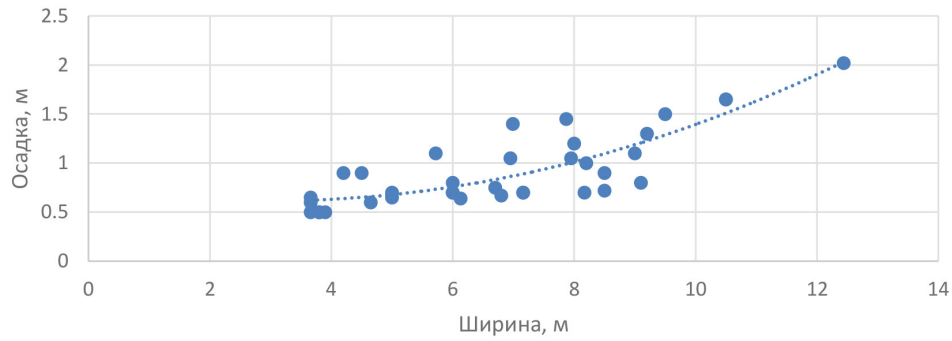


Рис. 6. Залежність осадки від ширини судна

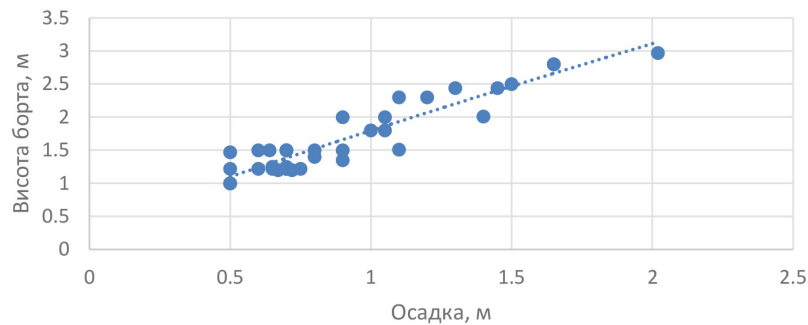


Рис. 7. Залежність висоти борту від осадки судна

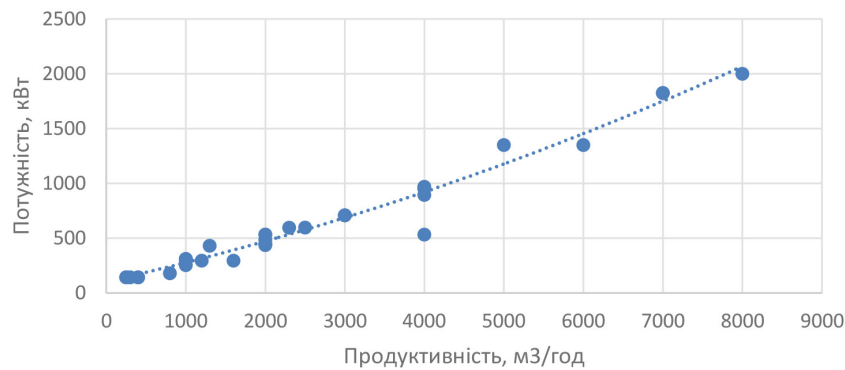


Рис. 8. Залежність потужності головного двигуна від продуктивності насоса

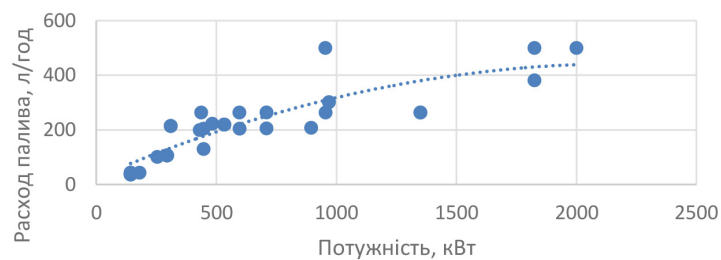


Рис. 9. Залежність витрат палива від потужності головного двигуна

Висота борту і відношення висоти борту земснаряда D до осадки d характеризують поздовжню міцність, морехідність, остійність використання потужності судна. На рис. 7 зображено залежність висоти борту D до осадки d .

Так, як потрібна продуктивність земснаряда, залежить в першу чергу від технічного завдання замовника, ґрунтові насоси будуть обрані по аналізу стандартних моделей виробників земснарядів. На рис. 8 зображено залежність потужності



Рис. 10. Залежність кількості членів екіпажу від продуктивності земснаряду

головного двигуна Ne від номінальної продуктивності насоса V .

Важливим критерієм для економічних властивостей земснаряда за навігаційний період тривалістю від 7 до 9 місяців в залежності від погодних явищ регіону розробки ґрунту, як найбільша витрата є витрати палива та витрати на екіпаж судна.

Тому витрати палива R , залежать найбільше від потужності Ne головного двигуна приводу ґрунтового насоса. Кількість екіпажу Ek зазвичай залежить від головного розміру судна, в випадках з земснарядами, зазвичай це довжина судна Lpp .

Кількість членів екіпажу земснаряда, залежить від довжини судна між перпендикулярами. Так як, чи більше судно, включно з моторним відділом, тим більше людей потрібно для обслуговування земснаряда. (Силової установки, насосів, якірних лебідок і т.д. На рисунку 10 представлена залежність кількості членів екіпажу від довжини судна між перпендикулярами.

Виконаний аналіз залежності головних розмірів та характеристик несамохідних понтонних земснарядів, результати надав можливість отримати наступні формули:

$$Lpp = Lmv + Lp + Lax;$$

$$Lp = -0,0093Dd^2 + 1,2417Dd - 3,896;$$

$$Lmv = -3E - 0,06Ne^2 + 0,0162Ne + 3,3836;$$

$$Lax = 0,0047Lmv^2 + 0,0628Lmv + 1,0618;$$

$$B = -0,0026Lpp^2 + 0,3008Lpp + 1,7124;$$

$$d = 0,0159B^2 - 0,0958xB + 0,7595$$

$$D = -0,0553d^2 + 1,4785d + 0,373;$$

$$Ne = 1E - 0,05V^2 + 0,1633V + 103,53;$$

$$R = -9E - 0,05Ne^2 + 0,3797Ne + 24,442;$$

$$Ek = -0,0013Lpp^2 + 0,1652Lpp + 2,068.$$

Ці формули можуть бути використані для наближеного визначення головних елементів несамохідних земснарядів понтонного типу на початкових етапах його проектування та для формування початкової точки пошуку їх значень в оптимізаційній задачі визначення головних елементів.

Розрахунок навантаження мас несамохідних земснарядів

На стадії проектування маса судна визначають наближеними методами, заснованими на застосуванні формул, до складу яких входять коефіцієнти відносної маси (вимірювач), а також елементи та характеристики судна (модуль). Величина кожної із складових навантаження мас може бути представлена в наступному вигляді:

$$P_i = \psi_i \cdot M_i,$$

де ψ_i , M_i – вимірювач і модуль i -ої складової навантаження мас.

З метою отримання статистичних залежностей для знаходження вимірювача маси та обґрунтування вибору виду модуля було проведено аналіз навантаження мас несамохідних земснарядів понтонного типу. Елементи та характеристики розглянутих проектів земснарядів підприємства «ВВВ-СПЕЦТЕХНІКА» в таблиці 2.

Таким чином, вагу несамохідного земснаряда понтонного типу порожнем можливо записати в наступному вигляді:

$$D = P_H + P_{HE} + P_{EH} + P_E + \Delta D,$$

де: P_H – маса розділу корпус; P_{HE} – маса розділу пристрої; P_{EH} – маса розділу ґрунтового насос; P_E – маса розділу електрообладнання; ΔD – запас водотоннажності.

Модуль для розрахунку складової навантаження мас судна зазвичай вибирають виходячи з логіки взаємозв'язків i -ої маси з елементами та характеристиками судна, обґрунтовуючи тим чи іншим способом його вид, спираючись на багаторічний досвід та теорію подіб і розмірностей. Нижче наведено результати дослідження щодо вибору оптимальних модулів. Було проаналізовано можливість використання чотирнадцяти модулів, від яких вдалося узагальнити з урахуванням вивчення досліджень, присвячених розрахунку навантаження мас на початкових стадіях проектування. В основі прийнятого кореляційно-регресійного аналізу для обґрунтування виду модуля лежить розгляд статистичної залежності вимірювача

Таблиця 2. Проекти земснарядів

Проект	L, м	B, м	H, м	T, м	δ	D, т	N, кВт	η , ек.
250/40	9,76	3,80	1,00	0,50	0,85	11,00	158	2
250/40	7,30	3,80	1,00	0,50	0,85	8,50	158	2
300/40	15,20	4,65	1,50	0,60	0,85	14,20	158	2
400/20	11,00	5,00	1,25	0,65	0,85	15,60	180	2
400/20	10,90	3,90	1,47	0,50	0,85	13,20	180	2
800/40	11,00	5,00	1,25	0,70	0,85	17,50	210	3
1600/25	27,69	6,13	1,50	0,64	0,85	42,05	310	4
1000/25	23,48	7,16	1,50	0,70	0,85	32,00	295	4
2000/63	39,00	8,71	1,50	0,70	0,85	51,00	375	5
1200/30	25,00	7,16	1,50	0,70	0,85	34,70	295	4
4000/71	40,00	8,50	2,00	0,90	0,85	57,50	437	6
6000/60	41,50	9,00	2,30	1,10	0,85	85,00	780	7
12000/60	42,00	9,50	2,50	1,50	0,85	100,50	1560	9

маси від того чи іншого модуля та виявлення певної закономірності його зміни.

Дати оцінку тісноти зв'язку між змінними, що розглядаються, дозволив коефіцієнт парної кореляції при лінійній залежності і індекс кореляції при нелінійній залежності (r). Зауважимо, що модулю, який точніше характеризує ту чи іншу масу, відповідає найбільше абсолютне значення коефіцієнта кореляції. Якщо коефіцієнт кореляції позитивний, це означає, що збільшення однієї змінної пов'язане зі збільшенням іншої і навпаки при негативному значенні коефіцієнта.

Критерій Фішера (F) дозволяє встановити достатність включених до рівняння регресії параметрів, що становлять модуль (незалежної змінної) для опису вимірювача маси (залежної змінної). Іншими словами, на основі F -критерію Фішера проводиться оцінка значущості отриманого рівняння регресії. Фактичне значення F порівнюється із табличним значенням $F_{\text{табл}}$. При цьому якщо фактичне значення F -критерію більше табличного, то визнається статистична значущість рівняння в цілому. Показники коефіцієнтів кореляції і критерію Фішера для складових навантаження мас, що розглядаються, залежно від модулів представлені в таблиці 3.

Розраховані коефіцієнти парної кореляції показують відсутність суворої залежності між змінними, що розглядаються. Це можна пояснити тим, що значення вимірювача маси визначається не тільки значенням

модуля, але й іншими неконтрольованими або неврахованими факторами. Наприклад, на масу металу корпусу впливають як геометричні характеристики корпусу (коефіцієнти повноти, співвідношення основних розмірів), а й клас судна, число, тип і розміри поперечних і поздовжніх перебірок, система набору. Безперечно, на наступних етапах проектування все це необхідно брати до уваги.

На рисунку 11 приведена залежність вимірювача маси корпусу земснаряда від найкращого, по приведеному в таблиці 3 модулю.

В результаті апроксимації була отримана залежність для вимірювача маси корпусу земснаряда від модуля:

$$\psi = 3,6326((LBH)^2)^{-0,565}.$$

На рисунку 3 приведена залежність вимірювача маси пристроїв земснаряда від найкращого, по приведеному в таблиці 4 модулю.

В результаті апроксимації була отримана залежність для вимірювача маси пристроїв земснаряда від модуля:

$$\psi = 5,732((LBH)^2)^{-0,647}.$$

На рисунку 14 приведена залежність вимірювача маси ґрунтонасосного обладнання земснаряда від найкращого, по приведеному в таблиці 3 модулю.

В результаті апроксимації була отримана залежність для вимірювача маси ґрунтонасосного обладнання земснаряда від модуля:

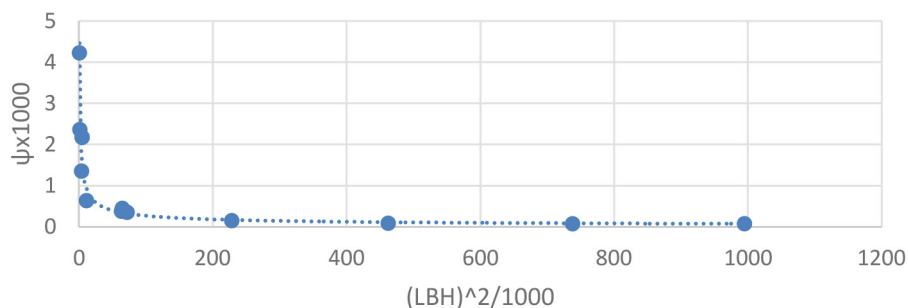


Рис. 11. Вимірювач маси корпусу судна

Таблиця 3. Критерій Фішера для складових навантаження мас

№	Модуль	Корпус			Пристрої			Ґрунтовий насос			Електрообладнання		
		r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$	r	F	$F_{табл}$
1	LBH	0,978	1.092	4.84	0,958	16.225	4.84	0,988	2.228	4.84	0,979	7.224	4.84
2	$\delta^{\frac{1}{3}} L^{\frac{4}{3}} (B+H)$	0,956	2.208	4.84	0,974	2.215	4.84	0,957	0.191	4.84	0,958	6.764	4.84
3	LB^2	0,961	11.544	4.84	0,969	8.797	4.84	0,962	2.753	4.84	0,964	8.965	4.84
4	$(LBH)^{5/6}$	0,978	0.0048	4.84	0,969	0.00372	4.84	0,984	4.324	4.84	0,978	3.438	4.84
5	$(LBH)^2$	0,989	63.85	4.84	0,982	64.077	4.84	0,982	64.215	4.84	0,985	1.596	4.84
6	N	0,819	8.608	4.84	0,697	0.246	4.84	0,832	0.246	4.84	0,814	0.0005	4.84
7	N^2	0,957	5.487	4.84	0,878	23.062	4.84	0,962	23.062	4.84	0,951	28.355	4.84
8	$N^{2/3}$	0,981	6.474	4.84	0,924	5.604	4.84	0,980	5.604	4.84	0,974	4.366	4.84
9	$BT\delta^{\frac{3}{4}}$	0,948	0.468	4.84	0,976	6.472	4.84	0,949	9.148	4.84	0,949	2.559	4.84
10	$(LBH)^{2/3}$	0,976	8.150	4.84	0,977	8.150	4.84	0,974	41.132	4.84	0,974	0.380	4.84

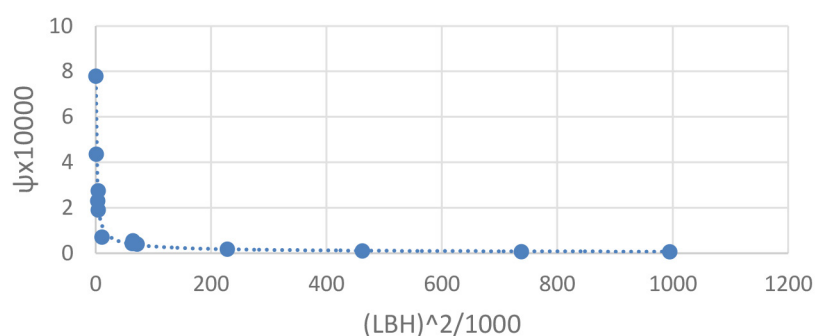


Рис. 13. Вимірювач маси пристроїв судна

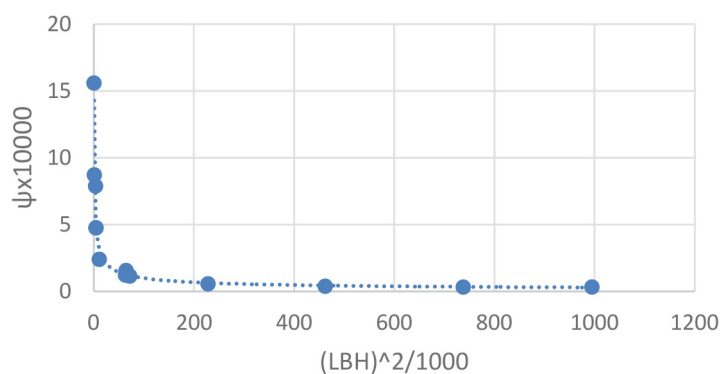


Рис. 14. Вимірювач маси ґрунтонасосного обладнання судна

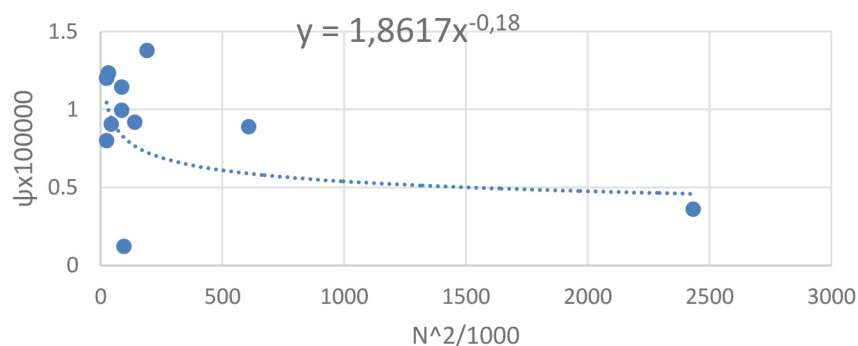


Рис. 15. Вимірювач маси електрообладнання судна

$$\psi = 11,74((LBH)^2)^{-0,539}.$$

На рисунку 15 приведена залежність вимірювача маси електрообладнання земснаряда від найкращого, по приведеним в таблиці 4 модулям.

В результаті апроксимації була отримана залежність для вимірювача маси електрообладнання земснаряда від модуля:

$$\psi = 1,8617((N)^2)^{-0,18}.$$

Таблиця 4. Перевірка % похибки розрахунків

Проект	Водотоннажність фактична, т	Водотоннажність розрахункова, т	Відносна похибка, %
250/40	11,00	11,43	3,76
250/40	8,50	8,86	4,06
300/40	14,20	14,59	2,67
400/20	15,60	16,05	2,80
400/20	13,20	13,85	4,69
800/40	17,50	18,92	7,51
1600/25	42,05	45,69	7,97

Обговорення отриманих результатів. Зростання потреби у проведенні днопоглиблювальних робіт у морських та річкових портах України, а також активізація промислового сектору, зокрема видобутку піску та очищення русел річок, веде до необхідності суттєвого збільшення ефективності та надійності суден технічного флоту. Значний вік вітчизняних земснарядів, виявлений під час аналізу їх стану (понад 63 % флоту старші 30 років), обумовлює низьку продуктивність та слабку надійність функціонування цих засобів. Експлуатація таких застарілих суден є економічно недоцільною через високе споживання палива та часті виходи з ладу, що негативно впливає на загальну вартість гідротехнічних робіт.

На сьогодні вибір характеристик земснарядів при поповненні флоту новими одиницями часто здійснюється без використання єдиної науково-обґрунтованої методологічної основи, що не враховує специфіку логістичних обмежень та сучасні вимоги до мобільності технічних засобів. Представлена в даній роботі методика наближеного визначення головних елементів дозволяє вирішити цю проблему шляхом впровадження математичних моделей, що базуються

на статистичному аналізі успішних проектів світових лідерів суднобудування, таких як «Damen» та «IHС».

Отримані регресійні залежності для довжини, ширини та осадки понтонних земснарядів дозволяють вже на стадії концептуального проектування враховувати архітектурно-конструктивні особливості судна, зокрема його розбірну конструкцію. Використання запропонованих модулів для розрахунку навантаження мас, зокрема модуля $((LBH)^2)$, забезпечує високу точність розрахунків із відносною похибкою не більше 10 %, що є достатнім для прийняття обґрунтованих проектних рішень на початкових етапах.

Таким чином, розроблена методологія створює підґрунтя для переходу від стихійного формування флоту до науково-керованого процесу його оновлення. Це дозволяє досягати раціональних значень показників ефективності та надійності суден технічного флоту в заданих умовах їх функціонування, забезпечуючи при цьому можливість транспортування суден наземними шляхами без надмірних витрат на логістику.

Висновок. У даному дослідженні розглянуто методику та математичні моделі, які дозволяють точніше визначати головні елементи несамохідних понтонних земснарядів, а отже, й покращувати ефективність проектних рішень та точність прогнозування техніко-економічних характеристик судна на основі отриманих регресійних залежностей, що забезпечує мінімізацію похибки при визначенні водотоннажності порожнем у межах 10 %.

Застосування запропонованих модулів для розрахунку мас корпусу та обладнання, зокрема з використанням параметра $(LBH)^2$, дає змогу суттєво скоротити час на початкових етапах проектування та оптимізувати габаритні характеристики суден для їх подальшого транспортування. Це створює надійне підґрунтя для автоматизації процесів проектування об'єктів технічного флоту та сприяє розробці високопродуктивних днопоглиблювальних засобів, необхідних для масштабного оновлення водної інфраструктури України. Перспективи подальших розвідок полягають у розширенні розробленого математичного апарату для самохідних суден та інтеграції отриманих рівнянь у спеціалізовані системи автоматизованого проектування (САПР).

REFERENCES

- [1] Vlasblom, W. J. (2003). *The cutter suction dredger*. TU Delft OpenCourseWare. <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Reading-3.pdf>
- [2] Papanikolaou, A. (2014). *Ship design: Methodologies of preliminary design*. Springer International Publishing.
- [3] International Association of Dredging Companies. (2024). *Dredging in figures 2024*. <https://www.iadc-dredging.com/>
- [4] Bray, R. N. (1979). *Dredging: A handbook for engineers*. (Publisher information not provided).
- [5] Overhagen, J. van, et al. (2004). On the conceptual design of large cutter suction dredgers; considerations for making choices. *Proceedings of WODCON XVII*.
- [6] Shang, X., & Xu, L. (2019). Productivity regression analysis of cutter suction dredger considering operating characteristics and equipment status. *Ocean Engineering*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106346>
- [7] Fasano, E. (2018). *Dredgers and dredging design restraints*. ATENA Indico Server.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Vlasblom W. J. The Cutter Suction Dredger. TU Delft OpenCourseWare. 2003. 79 p. URL: <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Reading-3.pdf> (дата звернення: 20.02.2026).
- [2] Papanikolaou A. Ship Design: Methodologies of Preliminary Design. Cham : Springer International Publishing, 2014. 614 p.
- [3] Dredging in Figures 2024. International Association of Dredging Companies (IADC). 2024. URL: <https://www.iadc-dredging.com/> (дата звернення: 05.03.2026).
- [4] Bray R. N. Dredging: a Handbook for Engineers. 1979. 294 p.
- [5] Overhagen J. van et al. On the conceptual design of large Cutter Suction Dredgers; Considerations for making choices. *Proceedings of WODCON XVII* (Hamburg, Germany, 2004). 2004.
- [6] Shang X., Xu L. Productivity regression analysis of cutter suction dredger considering operating characteristics and equipment status. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106346>
- [7] Fasano E. Dredgers and Dredging Design Restraints. ATENA Indico Server, 2018.

© Соценко В. В., Щедролосєв О. В.

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



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