

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАРЧУК АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 629.584

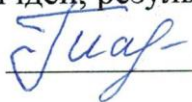
ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОГО
НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З РАДІОБУЄМ ДЛЯ
ОХОРОНИ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Спеціальність 135 – Суднобудування
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня: доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело  А.А. Тарчук

Науковий керівник: Блінцов Володимир Степанович,
д-р техн. наук, професор

м. Миколаїв - 2026

АНОТАЦІЯ

Тарчук А.А. Удосконалення проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 135 «Суднобудування» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»). – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробці науково-методологічних основ проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури в мілководних акваторіях.

Актуальність дисертаційного дослідження обумовлена необхідністю швидкого впровадження у морську практику новітніх досягнень підводної робототехніки охоронного призначення та необхідністю формування внутрішнього ринку передових морських роботизованих охоронних технологій в інтересах підприємств морегосподарського комплексу України.

Метою дослідження є створення науково-методологічного підґрунтя для проєктування морського робототехнічного комплексу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй», призначеного для охорони та технічного моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури в умовах мілководних акваторій, який би забезпечував оперативний радіозв'язок з береговим центром керування охоронною місією.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертації, полягає у наступному:

- вперше на основі системного аналізу загроз об'єктам морської критичної інфраструктури, що розташовані на мілководних акваторіях, запропоновано концепцію двохланкової автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй з дуговими несучими поверхнями» для охорони цих об'єктів, що забезпечує стабільність двостороннього

інформаційного обміну з береговим центром керування, зменшення енергетичних витрат та підвищення якості виконання охоронних місій;

- вперше отримано експериментальні залежності коефіцієнтів підйомної сили та опору для шорсткої та шліфованої дугових несучих поверхонь (крил) буксированого радіобуя при різних кутах атаки, які підтверджують їх ефективність як елемента конструкції автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй з дуговими несучими поверхнями». Результати випробувань моделі шорсткої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що в діапазоні кутів атаки до 18° реалізується безвідривне обтікання і залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ має прямо пропорційний характер. При цьому максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 0,9. Результати випробувань моделі шліфованої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що прямо пропорційний характер залежності коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ зберігається до кутів атаки майже 25° , а максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 1,0, що утворює теоретичну основу для проєктування такого засобу підводної робототехніки;

- на основі застосування системного підходу удосконалено методологію концептуального та зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм шляхом формулювання чотирьох взаємопов'язаних підмножин завдань концептуального проєктування, які містять конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, завдання оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу такого апарата, інформаційно-комунікаційні та керуючі завдання і завдання ефективного застосування такого апарата, що утворює науково-методологічну основу зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм та може бути використано для оцінки перспективності його створення та визначення технічних вимог для подальших етапів проєктування;

- на основі системного підходу удосконалено методологію внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим

радіобуєм шляхом формулювання генеральної множини основних завдань внутрішнього проєктування та підмножини основних наукових задач для їх виконання, які ґрунтуються на чотирьох системних критеріях «Матерія», «Енергія», «Інформація» та «Корисна функція», що утворює науково-методологічну основу внутрішнього проєктування такого виду підводної робототехніки.

Наукове значення результатів роботи полягає у тому, що вони утворюють науково-методологічну основу для швидкого та ефективного впровадження у вітчизняну галузь суднобудування нових знань та перспективних технічних рішень з підводної робототехніки охоронного призначення, що забезпечить технологічний суверенітет України у цьому прикладному науково-технічному напрямку.

Практичне значення результатів дослідження полягає в їх використанні для створення типорозмірного ряду підводних апаратів з буксируваними радіобуями різного цільового призначення. Результати дослідження мають прикладне значення для підвищення ефективності охорони та моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури України в умовах мілководдя, де традиційні системи зв'язку та енергозабезпечення працюють обмежено. Рекомендації щодо застосування дугових крил для буксируваних радіобуїв мають прикладне значення для розробників морських роботизованих комплексів і можуть бути використані в навчальному процесі закладів вищої освіти.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано її зв'язок з науковими темами, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та головні його задачі, представлено методи дослідження та обґрунтування достовірності отриманих результатів, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, відображено повноту викладення результатів у публікаціях та ступінь апробації на науково-технічних конференціях.

У першому розділі дисертації наведено коротку характеристику об'єктів морської критичної інфраструктури та завдання їх охорони, надано огляд та критичний аналіз сучасних засобів морської робототехніки для захисту таких об'єктів. Крім того, у розділі надано вичерпну характеристику автономного

ненаселеного підводного апарата з радіобуєм як сучасного інструменту охорони об'єктів морської критичної інфраструктури, сформульовано актуальні задачі механіки та гідромеханіки при проектуванні такого виду підводної робототехніки та сформовано мету та задачі дослідження.

Другий розділ дисертації присвячено розробці методології проектування та дослідження автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм. Тут описано сучасні теоретичні методи дослідження та проектування засобів підводної робототехніки, сформульовано основи системного підходу для етапів раннього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм та виконано формалізацію цільових функцій та критеріїв ефективності такого засобу підводної робототехніки охоронного призначення. Крім того, у розділі наведено опис та порівняльні оцінки експериментальних методів дослідження підводних апаратів.

Третій розділ дисертації присвячений, власне, удосконаленню проектування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм на основі системного підходу. Процес проектування у складі трьох основних етапів – концептуального, зовнішнього і внутрішнього проектування. Завдання концептуального проектування сформовані на прикладі охорони газових та газоконденсатних родовищ на українському шельфі. У якості інформаційної основи для оцінки доцільності залучення конкретних типів морських роботів для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури запропоновано тривимірну матрицю «Об'єкт МКІ ІС – Охоронна робота об'єкті МКІ J_{IC} – Ефективність охорони об'єкта МКІ EC », яка характеризує можливість та доцільність застосування конкретного типу засобу морської робототехніки для охорони інженерних споруд українського шельфу Азовського і Чорного морів й утворює інформаційну основу робіт з концептуального проектування засобів морської робототехніки такого призначення. На основі системного підходу розроблено узагальнену структуру роботизованої системи управління безпекою об'єктів морської критичної інфраструктури, яка ґрунтується на застосуванні автономних ненаселених підводних апаратів з буксируваними радіобуями. Отримана структура стала

інформаційною основою для формулювання завдань зовнішнього проєктування підводних апаратів такого типу для охорони об'єктів морської інфраструктури України. З позицій системного підходу сформовано генеральну множину завдань внутрішнього проєктування та надано наукове обґрунтування найбільш актуальним завданням такого етапу проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм.

У четвертому розділі досліджено гідродинамічні характеристики дугового крила при квазістаціонарному русі радіобуя. Встановлено, що вздовж крила його підйомна сила поступово змінює свій напрям і на самому кінці крила діє горизонтально. Це призводить до вихроутворення на закінцівках крила та появи дестабілізуючих крутильних моментів. Для зменшення вказаних впливів запропоновано аеродинамічне кручення крила шляхом поступового зменшення кута атаки вздовж лінії крила, та профіль кінцевих частин крила зроблено симетричним. Виконане CFD-моделювання дугового крила дало змогу оцінити розподіл тиску та зміну швидкості потоку, що набігає, по довжині цього крила. Методом 3D-друку було виготовлено дві фізичні моделі дугового крила – з технологічною шорсткістю поверхні та з технічно гладкою поверхнею. Результати випробування моделей крила в гідродинамічній трубі підтвердили принципову працездатність дугового крила. Зокрема, отримано прямо пропорційну залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки дугового крила (для першої моделі – до 18° , для другої моделі – до 25°). При цьому максимальний коефіцієнт підйомної сили, відповідно, для першого і другого варіантів моделі крила, досягав величин 0,9 і 1,0. Максимальна гідродинамічна якість має місце на кутах атаки близько 7° . Отримані залежності утворюють наукове підґрунтя для інженерного проєктування дугових крил буксированого радіобуя для автономного ненаселеного підводного апарата охоронного призначення.

Ключові слова: підводний апарат, буксирований прив'язний буй, судно-носій, форма корпусу, проєктування, системний підхід, гідродинамічна характеристика крила, охорона, технічний флот, береговий центр керування, об'єкт морської критичної інфраструктури,

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Трибулькевич В.В. Проектні задачі створення засобів морської робототехніки для охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури. Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. С. 79-91. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091 (Видання категорії Б)

2. Volodymyr S. Blintsov, Heorhii V. Babkin, Dmytro V. Kostenko, Volodymyr Moroz, Vitalii Korobov, Andrii Tarchuk. Design and Application of Marine Robotics with a Communication Buoy. POLISH MARITIME RESEARCH 4 (128) 2025 Vol. 32; pp. 142-149. DOI:[10.2478/pomr-2025-0057](https://doi.org/10.2478/pomr-2025-0057) (Scopus)

3. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання зовнішнього проектування підводного робота для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №3, 2025. С. 21-30. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).4](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).4) (Видання категорії Б).

4. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання внутрішнього проектування підводного апарата з радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №4, 2025. С. 3-12. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).1](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).1). (Видання категорії Б).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Блінцов В.С., Тарчук А.А.(2022). Сучасні задачі створення і застосування засобів морської робототехніки в інтересах України. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XIII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2022. – С. 108-110.

6. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. (2023). The task of creating marine robotics for the operation of engineering structures on the Ukrainian shelf. In book: Recent Research on Sedimentology, Stratigraphy, Paleontology, Tectonics, Geochemistry, Volcanology and Petroleum Geology. Publisher : Springer Nature, pp.215-219).

<https://www.researchgate.net/publication/397079534> The Task of Creating Marine Robotics for the Operation of Engineering Structures on the Ukrainian Shelf.
<https://www.researchgate.net/publication/397079534>

7. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. (2024). Robotic monitoring of facility security maritime critical infrastructure. Proceedings of the EMCEI (Scopus). 15-18 may, 2024. Marrakesh, Morocco. 5 pages.

8. Блінцов В.С., Тарчук А.А. (2024). Роботизовані технології охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», 15-16 травня 2024 року. Миколаїв : Іліон, 2024. С. 126-131.

9. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Фомбо Ж. Особливості конструкції та керування комплексом «автономний ненаселений підводний апарат з самохідним прив'язним радіобуєм». – Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI – 2024). Херсон, 28–29 листопада 2024.

10. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Тарчук А.А. Основні задачі створення дволанкової автономної підводної системи. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 961-963.

11. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Костенко Д.В., Мороз В.В., Коробов В.І., Тарчук А.А. Проблеми проектування і застосування засобів морської робототехніки з буєм зв'язку. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» , 22-23 травня 2025 року. Миколаїв : Іліон, 2025. С. 22-27.

12. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Огляд та аналіз засобів підводної робототехніки для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XVI Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2025. – С. 52-55.

ABSTRACT

Tarchuk A.A. Improving of the design of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy for the protection of marine critical infrastructure facilities. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 135 "Shipbuilding" (field of knowledge 13 "Mechanical Engineering"). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of scientific and methodological foundations for designing an autonomous unmanned underwater vehicle with a towed radio buoy for the protection of maritime critical infrastructure facilities in shallow waters.

The relevance of the dissertation research is driven by the need for the rapid introduction of the latest achievements in underwater robotics for security purposes into maritime practice and the necessity of forming a domestic market for advanced marine robotic security technologies in the interests of enterprises within the maritime economic complex of Ukraine.

The purpose of the research is to create a scientific and methodological foundation for the design of the marine robotic complex "Autonomous Unmanned Underwater Vehicle – Towed Radio Buoy", intended for the protection and technical monitoring of maritime critical infrastructure facilities in shallow waters, which would provide operational radio communication with the coastal control center of the security mission.

The scientific novelty of the results obtained in the dissertation is as follows:

For the first time, based on a systematic analysis of threats to maritime critical infrastructure facilities located in shallow waters, the concept of a two-link autonomous underwater system of the type "Autonomous Unmanned Underwater Vehicle – Towed Radio Buoy with Arcuate Lifting Surfaces" is proposed for the protection of these facilities, ensuring the stability of two-way information exchange with the coastal control center, reducing energy consumption, and improving the quality of executing security missions.

For the first time, experimental dependencies of the lift and drag coefficients for rough and polished arcuate lifting surfaces (wings) of the towed radio buoy at various angles of attack were obtained, confirming their effectiveness as a structural element of the autonomous underwater system of the type "Autonomous Unmanned Underwater Vehicle – Towed Radio Buoy with Arcuate Lifting Surfaces". The test results of the rough lifting surface model in a hydrodynamic tunnel show that in the range of angles of attack up to 18° , a separation-free flow is realized, and the dependence of the lift coefficient on the angle of attack of the wing $C_y=f(\alpha)$ has a directly proportional nature. At the same time, the maximum lift coefficient reaches values of 0.9. The test results of the polished lifting surface model in a hydrodynamic tunnel indicate that the directly proportional nature of the dependence of the lift coefficient on the angle of attack of the wing $C_y=f(\alpha)$ is maintained up to angles of attack of almost 25° , and the maximum lift coefficient reaches values of 1.0, which forms the theoretical basis for designing such an underwater robotics tool.

Based on the application of a systematic approach, the methodology of conceptual and external design of an autonomous unmanned underwater vehicle with a towed radio buoy has been improved by formulating four interconnected subsets of conceptual design tasks. These include structural-layout and hydrodynamic tasks, tasks for evaluating energy consumption savings for the propulsion complex of such a vehicle, information-communication and control tasks, and tasks for the effective application of such a vehicle. This forms the scientific and methodological basis for the external design of an autonomous unmanned underwater vehicle with a towed radio buoy and can be used to assess the prospects for its creation and determine technical requirements for subsequent design stages.

Based on a systematic approach, the methodology of internal design of an autonomous unmanned underwater vehicle with a towed radio buoy has been improved by formulating a general set of main internal design tasks and a subset of basic scientific problems for their execution. These are based on four system criteria: "Matter", "Energy", "Information", and "Useful Function", which forms the scientific and methodological basis for the internal design of this type of underwater robotics.

The scientific significance of the work results is that they form a scientific and methodological basis for the rapid and effective implementation of new knowledge and promising technical solutions in underwater robotics for security purposes into the domestic shipbuilding industry, which will ensure the technological sovereignty of Ukraine in this applied scientific and technical area.

The practical significance of the research results lies in their use to create a size range of underwater vehicles with towed radio buoys for various target purposes. The research results have applied significance for improving the efficiency of protection and monitoring of maritime critical infrastructure facilities in Ukraine under shallow water conditions, where traditional communication and power supply systems operate with limitations. Recommendations regarding the use of arcuate wings for towed radio buoys have applied significance for developers of marine robotic complexes and can be used in the educational processes of higher education institutions.

The introduction of the dissertation justifies the relevance of the research topic, shows its connection with scientific topics, formulates the object and subject of research, its goal and main tasks, presents research methods and justification for the reliability of the obtained results, determines the scientific novelty and practical significance of the work results, and reflects the completeness of the presentation of results in publications and the degree of testing at scientific and technical conferences.

The first chapter of the dissertation provides a brief description of maritime critical infrastructure facilities and the tasks of their protection, offering an overview and critical analysis of modern marine robotics tools for defending such facilities. In addition, the chapter provides a comprehensive characterization of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy as a modern tool for protecting maritime critical infrastructure facilities, formulates relevant tasks of mechanics and hydromechanics when designing this type of underwater robotics, and defines the goal and tasks of the research.

The second chapter of the dissertation is devoted to developing a methodology for the design and research of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy. It describes modern theoretical methods for researching and designing underwater robotics, formulates the basics of a systematic approach for the early design stages of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy, and formalizes the objective functions and efficiency criteria for this type of underwater robotic security tool. In addition, the chapter provides a description and comparative evaluations of experimental methods for researching underwater vehicles.

The third chapter of the dissertation is strictly devoted to improving the design of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy based on a systematic approach. The design process consists of three main stages: conceptual, external, and internal design. The tasks of conceptual design are formulated using the example of protecting gas and gas condensate fields on the Ukrainian shelf. As an information basis for assessing the feasibility of engaging specific types of marine robots to protect maritime critical infrastructure facilities, a three-dimensional matrix "MCI Facility IS – Security operation of MCI facility JIS– Security efficiency of MCI facility EC" is proposed. This matrix characterizes the possibility and expediency of using a specific type of marine robotic tool for protecting engineering structures on the Ukrainian shelf of the Azov and Black Seas and forms the information basis for conceptual design work on marine robotics intended for this purpose. Based on a systematic approach, a generalized structure of a robotic security management system for maritime critical infrastructure facilities has been developed, which relies on the use of autonomous unmanned underwater vehicles with towed radio buoys. The resulting structure serves as the information basis for formulating external design tasks for underwater vehicles of this type to protect maritime infrastructure facilities in Ukraine. From the standpoint of a systematic approach, a general set of internal design tasks is formed, and a scientific justification is provided for the most pressing tasks of this stage in designing an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy.

The fourth chapter investigates the hydrodynamic characteristics of an arcuate wing during the quasi-stationary movement of a radio buoy. It has been established that along the wing, its lift force gradually changes direction and acts horizontally at the very tip of the wing. This leads to vortex formation at the wingtips and the appearance of destabilizing torsional moments. To reduce these effects, an aerodynamic twisting of the wing by gradually reducing the angle of attack along the wing line is proposed, and the profile of the end parts of the wing is made symmetrical. The performed CFD modeling of the arcuate wing made it possible to evaluate the pressure distribution and the change in the velocity of the incoming flow along the length of this wing. Using 3D printing methods, two physical models of the arcuate wing were manufactured: one with technological surface roughness and one with a technically smooth surface. The test results of the wing models in a hydrodynamic tunnel confirmed the fundamental operability of the arcuate wing. In particular, a directly proportional dependence of the lift coefficient on the angle of attack of the arcuate wing was obtained (for the first model – up to 18° , for the second model – up to 25°). At the same time, the maximum lift coefficient for the first and second wing model variants reached values of 0.9 and 1.0, respectively. The maximum hydrodynamic efficiency occurs at angles of attack of about 7° . The obtained dependencies form the scientific basis for the engineering design of arcuate wings for a towed radio buoy intended for an autonomous unmanned underwater vehicle for security purposes.

Keywords: underwater vehicle, tethered towed buoy, carrier vessel, hull shape, design, systematic approach, hydrodynamic characteristic of a wing, protection, technical fleet, shore control center, maritime critical infrastructure facility.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1 Коротка характеристика об'єктів морської критичної інфраструктури та завдання їх охорони.....	24
1.2 Огляд та критичний аналіз сучасних засобів морської робототехніки для захисту об'єктів морської критичної інфраструктури.....	27
1.3 Автономний ненаселений підводний апарат з буксируваним радіобуєм як сучасний інструмент охорони об'єктів морської критичної інфраструктури...	38
1.4 Актуальні задачі механіки та гідромеханіки при проєктуванні автономного ненаселеного підводного апарата з буксируваним радіобуєм та постановка задачі дослідження.....	41
Висновки до розділу 1.....	45
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З БУКСИРУВАНИМ РАДІОБУЄМ.....	47
2.1 Постановка задачі.....	48
2.2 Теоретичні методи дослідження та проєктування засобів підводної робототехніки.....	52
2.3 Системний підхід на етапі проєктування АНПА-РБ.....	55
2.4 Формалізація цільових функцій та критеріїв ефективності АНПА-РБ у порівнянні з АНПА, СППА та БПА традиційної конструкції.....	59
2.5 Експериментальні методи дослідження АНПА-РБ.....	65
Висновки до розділу 2.....	76

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З БУКСИРУВАНИМ РАДІОБУЄМ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ.....77

3.1 Основні етапи проєктування засобів морської робототехніки охоронного типу.....77

3.2 Завдання концептуального проєктування морської робототехніки для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на українському шельфі (на прикладі газових та газоконденсатних родовищ).....78

3.3 Аналіз загроз безпеці об'єктам МКІ на основі системного підходу та узагальнена структура автоматизованої системи управління безпекою на основі використання АНПА-РБ.....83

3.4 Завдання зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм.....91

3.5 Завдання внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм.....105

Висновки до розділу 3.....118

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ ДУГОВОГО КРИЛА ПРИ КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РУСІ БУКСИРУВАНОВОГО РАДІОБУЯ.....121

4.1 Застосування теорії крила в авіабудуванні й суднобудуванні та постановка задачі.....121

4.2 Особливості застосування дугового крила у конструкції буксируваного радіобуя.....124

4.3 Застосування технології CFD-моделювання для дослідження дугового крила буксируваного радіобуя.....129

4.4 Виготовлення дугового крила за допомогою адитивних технологій...131

4.5 Підготовка до експерименту у гідродинамічній трубі моделі дугового крила буксируваного радіобуя.....134

4.6 Результати випробувань моделі дугового крила в гідродинамічній трубі.....138

Висновки до розділу 4.....	144
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТКИ.....	160
Додаток А. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	161
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	162

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

АНПА — автономний ненаселений підводний апарат

АНПА-РБ — автономний ненаселений підводний апарат з буксированим радіобуєм

БЦК — береговий центр керування

ВАП — висувний антенний пристрій

ВЛ — висувний ложемент

ЗПР — засіб підводної робототехніки

КБ — кабель-буксир

ЛБК — лебідка кабель-буксиру

МКІ — морська критична інфраструктура

РБ — радіобуй

ПФ — привод фіксатора

СВЛ — стулки висувного ложемента

СППА — самохідний прив'язаний підводний апарат

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена розробці науково-методологічних основ проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм (АНПА-РБ) для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ) в мілководних акваторіях.

Актуальність теми дисертаційного дослідження обумовлена наступними чинниками, стратегічно важливими для воднотранспортної галузі України:

- необхідністю швидкого впровадження у морську практику новітніх досягнень підводної робототехніки охоронного призначення;

- необхідністю формування внутрішнього ринку передових морських безекіпажних транспортних, природоохоронних, охоронних та оборонних технологій.

Таким чином, розробка і створення нових засобів морської робототехніки належить до ключових напрямків модернізації українського суднобудування, що поєднує економіку, безпеку, науку та освіту в єдину систему інноваційного розвитку воднотранспортної галузі України.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках Угоди про наукове та науково-технічне співробітництво з Державним науково-дослідним інститутом випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки та в рамках госпдоговірної науково-дослідної роботи №2358 «Розробка концепції та організаційно-технічних вимог до проєктування і будівництва засобів морської робототехніки оборонного призначення», шифр «ЗМР-1».

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є створення науково-методологічного підґрунтя для проєктування морського робототехнічного комплексу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй», призначеного для охорони та технічного моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури в умовах мілководних акваторій, який би забезпечував оперативний радіозв'язок з береговим центром керування охоронною місією.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних засобів морської робототехніки, що застосовуються для моніторингу й охорони об'єктів МКІ;
- обґрунтувати доцільність застосування дволанкових підводних систем типу АНПА-РБ для задач охорони об'єктів МКІ;
- сформулювати та обґрунтувати завдань концептуального, зовнішнього і внутрішнього проєктування АНПА-РБ для охорони об'єктів МКІ на мілководних акваторіях;
- виконати дослідження гідродинамічних властивостей дугової несучої поверхні (крила) буксированого радіобуя АНПА як інноваційного технічного рішення, яке забезпечує компактне розміщення радіобуя у корпусі підводного апарата і виведення радіобуя на поверхню моря для оперативного радіозв'язку з береговим центром керування охоронною місією.

Об'єктом дослідження є процес проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм, призначеного для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури у мілководних акваторіях.

Предмет дослідження – задачі концептуального, зовнішнього і внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм, дослідження гідродинамічних характеристик дугової несучої поверхні буксированого радіобуя як інноваційного технічного рішення, яке забезпечує компактне розміщення радіобуя у корпусі підводного апарата і виведення радіобуя на поверхню моря для оперативного радіозв'язку з береговим центром керування охоронною місією

Методи дослідження. У роботі застосовано метод системного підходу – для врахування взаємодії всіх елементів автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм як єдиного робототехнічного комплексу, рівняння існування підводного апарата, що проєктується, як єдиної технічної системи, метод оцінювання технічної доцільності та економічної ефективності проєктування та експлуатації такого апарата, а також сучасні адитивні технології виготовлення

моделей дугових крил та експериментального дослідження їх гідродинамічних характеристик у гідродинамічній трубі.

Наукова новизна

1. Вперше на основі системного аналізу загроз об'єктам морської критичної інфраструктури, що розташовані на мілководних акваторіях, запропоновано концепцію двохланкової автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй з дуговими несучими поверхнями» для охорони цих об'єктів, що забезпечує стабільність двостороннього інформаційного обміну з береговим центром керування, зменшення енергетичних витрат та підвищення якості виконання охоронних місій.

2. Вперше отримано експериментальні залежності коефіцієнтів підйомної сили та опору для шорсткої та шліфованої дугових несучих поверхонь (крил) буксированого радіобуя при різних кутах атаки, які підтверджують їх ефективність як елемента конструкції автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй з дуговими несучими поверхнями». Результати випробувань моделі шорсткої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що в діапазоні кутів атаки до 18° реалізується безвідривне обтікання і залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ має прямо пропорційний характер. При цьому максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 0,9. Результати випробувань моделі шліфованої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що прямо пропорційний характер залежності коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ зберігається до кутів атаки майже 25° , а максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 1,0, що утворює теоретичну основу для проєктування такого засобу підводної робототехніки.

3. На основі застосування системного підходу удосконалено методологію концептуального та зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм шляхом формулювання чотирьох взаємопов'язаних підмножин завдань концептуального проєктування, які містять конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, завдання оцінки економії

енерговитрат рушійного комплексу такого апарата, інформаційно-комунікаційні та керуючі завдання і завдання ефективного застосування такого апарата, що утворює науково-методологічну основу зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм та може бути використано для оцінки перспективності його створення та визначення технічних вимог для подальших етапів проєктування.

4. На основі системного підходу удосконалено методологію внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм шляхом формулювання генеральної множини основних завдань внутрішнього проєктування та підмножини основних наукових задач для їх виконання, які ґрунтуються на чотирьох системних критеріях «Матерія», «Енергія», «Інформація» та «Корисна функція», що утворює науково-методологічну основу внутрішнього проєктування такого виду підводної робототехніки.

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується: коректністю постановки завдань дослідження, використанням системного підходу до формулювання завдань концептуального, зовнішнього і внутрішнього проєктування морської робототехніки та коректністю проведення експериментальних досліджень моделі дугового крила у гідродинамічній трубі Інституту гідромеханіки НАН України.

Наукове значення результатів роботи полягає в тому, що вони утворюють науково-методологічну основу для швидкого та ефективного впровадження у вітчизняну галузь суднобудування нових знань та перспективних технічних рішень з підводної робототехніки охоронного призначення, що забезпечить технологічний суверенітет України у цьому прикладному науково-технічному напрямку.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані у результаті дисертаційних досліджень наукові результати можуть бути використані при створенні типорозмірного ряду підводних апаратів з буксируемими радіобуями різного цільового призначення – від наукових до оборонних і гуманітарних. Результати дослідження мають прикладне значення для підвищення ефективності

охорони та моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури України в умовах мілководдя, де традиційні системи зв'язку та енергозабезпечення працюють обмежено. Рекомендації щодо застосування дугових крил для буксируваних радіобуїв мають прикладне значення для розробників морських роботизованих комплексів і можуть бути використані в навчальному процесі закладів вищої освіти.

Особистий внесок здобувача. В роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать: у [1] – запропоновано концепцію удосконалення автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, який поєднує переваги типових автономних та прив'язних ненаселених підводних апаратів, у результаті чого отримано архітектурно-конструктивний тип підводного апарата, робота якого не обмежена дистанцією до судна забезпечення; у [2] – експериментальні залежності коефіцієнтів підйомної сили та опору для шорсткої та шліфованої дугових несучих поверхонь (крил) буксируваного радіобуя при різних кутах атаки; у [3] – застосування системного підходу до зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм; у [4] – генеральна множина основних завдань внутрішнього проєктування АНПА-РБ та підмножина основних наукових задач для їх виконання, що утворює науково-методологічну основу внутрішнього проєктування такого виду підводної робототехніки.

Відомості про апробацію результатів дослідження. Основні положення і результати досліджень обговорювалися і отримали позитивні відгуки на 8 міжнародних науково-технічних конференціях: «Інновації в суднобудування та океанотехніці», 2022, 2024 і 2025 рр., м. Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова; «The 3rd Mediterranean Geosciences Union Annual Meeting» (MedGU-23), Istanbul (Turkey), 2023 р.; «Сучасні технології проєктування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», 2024 р. і 2025 р., м. Миколаїв, НУК ім. адм. Макарова; «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI – 2024), м. Херсон, Херсонська державна морська академія, 2024 р.; «The 6th Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration» (EMJEI), Marrakesh, (Morocco), 2024 р.

Публікації. Основні положення та результати досліджень висвітлені у 12 друкованих наукових працях, у тому числі у 3 періодичних наукових фахових виданнях України категорії «Б», 1 зарубіжному періодичному фаховому виданні, яке індексується у базі «Scopus» (2 квартиль), та у матеріалах 2 науково-технічних конференцій, виданих видавництвом «Springer».

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 86 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 164 сторінки, у тому числі 30 рисунків і 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1. КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Коротка характеристика об'єктів морської критичної інфраструктури та завдання їх охорони

Морська критична інфраструктура (МКІ) — це сукупність інженерних, транспортних і технологічних об'єктів, що забезпечують функціонування ключових галузей національної економіки, енергетики, зв'язку та безпеки держави [1]. До складу МКІ належать:

підводні та надводні енергетичні комплекси (нафтові, газові та бурові платформи);

підводні трубопроводи та кабельні лінії зв'язку, які забезпечують енергетичну та інформаційну взаємодію між державами;

портова інфраструктура (гідротехнічні споруди, нафто-газові платформи, причальні комплекси, навігаційні системи);

об'єкти морського транспорту — фарватери, судноплавні канали, системи забезпечення руху суден.

Ці об'єкти є основою морської економіки держави, визначають рівень енергетичної незалежності та інформаційної безпеки. Порушення їх функціонування може призвести до економічних збитків, екологічних катастроф і загроз національній безпеці.

1.1.1 Загрози об'єктам морської критичної інфраструктури

Залежно від джерела походження, загрози МКІ поділяють на зовнішні та внутрішні.

Зовнішні загрози формуються під впливом таких чинників:

- активізація діяльності транснаціональної організованої злочинності та терористичних організацій у морських акваторіях;

- посилення конкуренції за контроль над транспортними та енергетичними маршрутами;

- технологічне відставання систем захисту від засобів несанкціонованого впливу (в тому числі роботизованих апаратів іншого походження);
- природні та техногенні катастрофи — шторми, цунамі, землетруси, вибухи, аварії бурових комплексів;
- військові конфлікти (підводна війна) та дії диверсійних груп у прибережних і шельфових зонах [2, 3].

Внутрішні загрози пов'язані з протиправною діяльністю всередині морського середовища:

- несанкціоноване проникнення в акваторію (диверсії, підводні атаки, піратство);
- пошкодження енергетичного чи комунікаційного обладнання;
- кібератаки на системи управління та зв'язку морських об'єктів;
- злочинні дії проти персоналу (шантаж, викрадення, насильницькі дії);
- аварійні або помилкові дії обслуговуючого персоналу, що призводять до порушення безпеки об'єкта.

Окрему групу становлять загрози природного походження — сильні течії, ерозія дна, шторми, які можуть унеможливити експлуатацію підводних комунікацій або створити ризики для роботизованих засобів обслуговування.

Виходячи з принципів системного підходу [4, 5], який передбачає урахування всіх значущих складових об'єкта та їх взаємного впливу, сучасні загрози об'єктам МКІ укрупнено можна класифікувати чотирма основними видами:

- загрози об'єктам МКІ як матеріальним об'єктам (фізичні загрози); такі загрози націлені на руйнування об'єктів МКІ або послаблення їхнього функціонування за призначенням шляхом втручання у фізичну структуру або матеріальні компоненти цих об'єктів;
- загрози енергетичній безпеці об'єктів МКІ, оскільки перебої електропостачання призводять до їхньої непрацездатності;
- загрози інформації, що циркулює на об'єктах МКІ (кібернетичні загрози); такі погрози націлені на знищення чи спотворення інформації або затримку (блокування) доступу до неї санкціонованих користувачів;

- загрози людям (обслуговуючому персоналу та пасажирам), націлені на життя, здоров'я та свободу людей.

1.1.2 Завдання охорони об'єктів МКІ

У зв'язку з багатофакторністю загроз, основними завданнями охорони об'єктів морської критичної інфраструктури є:

безперервний моніторинг підводної та надводної обстановки на захищених акваторіях у реальному часі;

виявлення і класифікація загроз на ранніх етапах їх утворення;

інспекція технічного стану підводних елементів інженерних споруд (кабелів, трубопроводів, фундаментів, опорних конструкцій морських платформ);

реагування на надзвичайні ситуації – усунення пошкоджень, знешкодження об'єктів, проведення ремонтних робіт;

забезпечення екологічного контролю морського середовища навколо об'єктів МКІ.

1.1.3 Необхідність застосування роботизованих систем

Сучасні підходи до охорони МКІ передбачають широке впровадження засобів морської робототехніки, яка здатна забезпечити автономний або дистанційно керований моніторинг надводного і підводного простору захищених акваторій [6, 7].

Зокрема, малорозмірні безекіпажні надводні судна (БНС, рис. 1.1, а) забезпечують моніторинг надводної обстановки на захищених акваторіях, автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, рис. 1.1, б) дозволяють здійснювати тривале підводне патрулювання без участі людини, самохідні прив'язні підводні апарати (СППА, рис. 1.1, в) забезпечують точні маніпуляційні дії під контролем оператора, а буксировані підводні апарати – високопродуктивне гідроакустичне обстеження акваторій (рис. 1.1, г).

Однак, сьогодні ефективна охорона і захист об'єктів МКІ потребує створення нового покоління ЗМР, які будуть забезпечувати своєчасне виявлення, оцінювання та нейтралізацію загроз природного, техногенного або диверсійного характеру.



а – науково-дослідне БНС (Канада)



б – АНПА «REMUS 600» (США)



в – СППА «Софокл» (Україна, НУК)



г – БПА «Глайдер» (Україна, НУК)

Рисунок 1.1 – Типові засоби підводної робототехніки

Саме ця наукова проблема визначає постановку подальших задач дисертаційного дослідження.

1.2 Огляд та критичний аналіз сучасних засобів морської робототехніки для захисту об'єктів морської критичної інфраструктури

Об'єкти МКІ – порти, термінали зрідженого газу, підводні кабелі, нафто– і газовидобувні платформи та підводні трубопроводи, гідротехнічні споруди – є стратегічними складовими національної економіки та безпеки. Захист цих об'єктів від ворожих дій, саботажу, незаконного доступу чи технічних ушкоджень вимагає застосування високотехнологічних засобів моніторингу, розвідки та реагування. У цьому контексті морська робототехніка, зокрема безкіпажні надводні судна та підводні апарати-роботи (AUV/ROV — Autonomous Underwater Vehicles / Remotely

Operated Vehicles) апарати-роботи виступають ключовою технологією для забезпечення охорони та ситуаційної обізнаності без прямої участі людини.

Розглянемо основні класи ЗМР для захисту об'єктів МКІ [8].

1.2.1. Безекіпажні надводні судна (БНС, в англomовній літературі – Unmanned Surface Vehicle, USV) – це автономні або дистанційно керовані платформи, оснащені сенсорами, радарми, камерами, гідролокаторами та засобами зв'язку, які можуть патрулювати акваторії портів і підходів до об'єктів МКІ, виконувати виявлення об'єктів, класифікацію потенційних загроз та передавати дані в реальному часі до центру управління.

У літературі [9, 10] наведено приклади використання БНС для охорони морських терміналів та портової інфраструктури, надаються аналітичні огляди та дослідження, які включають розгляд можливостей БНС для виконання задач виявлення підводних/надводних загроз, спостереження за судноплавним трафіком, моніторингу периметра терміналів та інтеграції даних із береговими системами.

Це підкреслює тренд використання БНС як частини комплексної системи безпеки портів і терміналів. (рис. 1.2).



а – БНС «Uni-Mini» (Австралія)



б – БНС Харбінського технічного
університету (КНР)

Рисунок 1.2 – Безекіпажні надводні судна

Сучасні дослідження також приділяють увагу розробці платформ, здатних працювати в умовах втрати GNSS-сигналу (наприклад, БНС-носій для UAV), що є

критичною можливістю у випадку навмисних сигналових завад або атаки на навігаційну інфраструктуру [11].

На сьогодні надводні безпілотні судна відіграють ключову роль у створенні першого вимірювального шару охоронної системи: вони виконують патрулювання поверхні, підтримують зв'язок з берегом і часто використовуються як носії датчиків або платформи для розгортання підводних апаратів.

Головні переваги БНС — великий радіус дії над водою, відносно низька собівартість патрулювання одиниці площі та простота зарядної/логістичної інтеграції з береговими центрами. Такі засоби морської робототехніки ефективні для візуального та радіолокаційного спостереження за надводною обстановкою на захищеній акваторії, для виявлення суден-порушників, а також для координування спільних охоронних операцій з використанням різних засобів робототехніки.

Водночас вони мають значні обмеження при завданнях безпосереднього підводного огляду: сенсорні можливості БНС щодо висвітлення підводної обстановки обмежені (навіть за наявності буксируваних датчиків), а робота в складних погодних умовах (високий рівень хвилювання морської поверхні, вітрові збурення) значно знижує їхні спроможності.

З технічної точки зору БНС також є вразливими до кібернетичних впливів і електромагнітних перешкод, а також є питання автономної навігації у складних прибережних районах (інтенсивність руху на акваторії, навігаційні перешкоди), які потребують додаткового опрацювання.

1.2.2. Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, в англomовній літературі – Autonomous Underwater Vehicles, AUV) застосовуються для підводного патрулювання, розвідки та виявлення потенційних загроз: мін, підводних пристроїв, пошкоджень кабельних ліній чи конструкцій, а також для оцінювання стану інженерних споруд під водою (рис 1.3). Такі ЗПР можуть не лише здійснювати моніторинг підводної обстановки, а й виконувати завдання активної протидії загрозам безпеці захищених об'єктів МКІ.



а – АНПА компанії «IQUA Robotics»
(Іспанія) для інспекції підводних кабелів

б – АНПА «SPICE» (Японія) для
інспекції підводних трубопроводів

Рисунок 1.3 – Інспекційні автономні ненаселені підводні апарати

До таких завдань відносяться завдання силового впливу на порушників спеціальними засобами стримування (зазвичай, нелетальної дії) та групового застосування АНПА [12].

АНПА — інструмент для підводного моніторингу: картографування дна, інспекції кабелів і трубопроводів, акустичного пошуку аномалій. Їхня основна перевага – автономність та можливість тривалих місій на значних глибинах без постійної участі оператора.

Сучасні АНПА обладнують сонарними станціями, магнітометрами, оптикою і набором екологічних сенсорів, що робить їх невід’ємною частиною системи охорони МКІ.

Проте АНПА мають критичні недоліки. По-перше, навігація під водою залишається технічно складною. По-друге, зв’язок АНПА з БЦК в реальному часі обмежений. По-третє, енергетична автономність — ключова проблема, оскільки ємності акумуляторів АНПА наразі обмежують тривалість місій та спектр виконуваних завдань.

Відтак АНПА менш придатні для задач, що потребують миттєвого втручання або постійного каналу зв’язку.

У дослідженнях [13] також розглядається потенціал підвищення автономності таких апаратів шляхом вдосконалення контролю над рухом, взаємодії з середовищем та інтеграції сенсорних даних для самостійної навігації у складних умовах.

1.2.3. Самохідні прив'язні підводні апарати (СППА, в англomовній літературі – Remotely Operated Vehicles, ROV) – це засіб для точних підводних операцій: підводні приладові вимірювання, ремонт підводного обладнання, маніпуляції, знешкодження, підйом предметів.

Наявність кабельного з'єднання гарантує енергопостачання і двосторонню передачу даних у режимі реального часу, що робить СППА невід'ємними при виконанні складних тактичних завдань. Для захисту МКІ вони є незамінними у режимі оперативного реагування. (рис 1.4).



а – СППА серії «Інспектор»
(Україна, НУК)



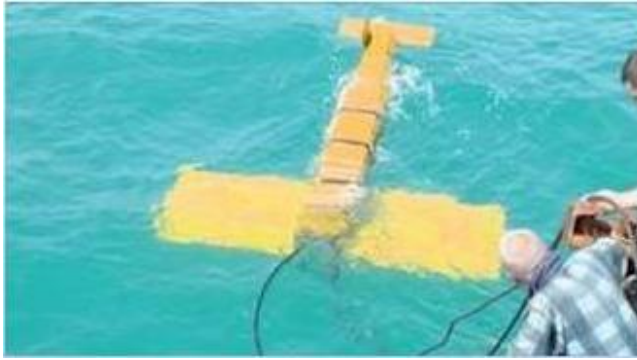
б – СППА компанії «NWE»
(Норвегія)

Рисунок 1.4 – Інспекційні самохідні прив'язні підводні апарати

Головні недоліки СППА — обмежений радіус дії, залежність від наявності судна-носія, складність експлуатації в умовах непогоди, високі логістичні витрати та ризики, пов'язані з перебуванням персоналу на судні.

Крім того, кабельна прив'язка ускладнює роботу у відкритому морі на великих відстанях та підвищує ймовірність заплутування і механічних пошкоджень кабель-тросу.

1.2.4. Буксирувані підводні апарати (БПА, в англomовній літературі – Towed Underwater Vehicles, TUV) є класом підводних технічних засобів, що переміщуються у водному середовищі за рахунок руху судна-буксирувальника та з'єднані з ним механічним і інформаційним кабелем-буксиром (рис. 1.5).



а – БПА проекту «Планер»
(Україна, НУК)



б – БПА «KATFISH» фірми
«KRAKEN»

Рисунок 1.5 – Буксировані підводні апарати

У задачах захисту об'єктів морської критичної інфраструктури вони застосовуються переважно для:

- протимінного та протидиверсійного обстеження акваторій;
- контролю підводних трас кабелів і трубопроводів;
- швидкого широкосмугового гідролокаційного огляду;
- первинного виявлення аномалій та підозрілих предметів.

До переваг БПА відносять:

- високу продуктивність огляду акваторії, оскільки з-за великої швидкості руху та широкій смузі покриття при виконанні гідролокаційного огляду досягається значна продуктивність за площею (км²/год);
- стабільне енергозабезпечення, необмежений час роботи та постійно працюючий канал зв'язку з БЦК через апаратуру судна-буксирувальника;
- простота конструкції та висока надійність БПА, оскільки відсутні рушії та складні системи керування рухом апарата;
- висока точність географічної прив'язки результатів обстеження акваторії, яка забезпечується через навігаційну систему судна-буксирувальника з урахуванням параметрів кабелю.

До недоліків БПА відносяться:

- залежність від носія та обмежена маневреність підводного апарата;

- обмежена придатність до активних дій, оскільки БПА є пасивним інструментом спостереження за підводною обстановкою;
- обмеження руху в мілководних та закритих акваторіях;
- чутливість до гідрометеорологічних умов та умов експлуатації (хвилювання моря, зміна швидкості та курсу судна-буксирувальника, турбулентність у придонному шарі води).

Виходячи з наведених вище властивостей ЗМР, визначимо математичні критерії ефективності вибору конкретного виду засобу морської робототехніки, який доцільно застосовувати для охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури України, які розташовані на мілководних акваторіях (з глибинами до 80-100 метрів).

1.2.5. Критеріальна оцінка ЗМР для охорони і захисту об'єктів МКІ.

Нехай множина видів ЗМР має вигляд:

$$\mathcal{M} = \{\text{МБНС; АНПА; СППА; БПА}\},$$

де $\mathcal{M}$ – множина видів засобів робототехніки.

Постановка задачі – знайти кращий варіант ЗМР для розв'язку завдань охорони і захисту об'єктів МКІ:

$$a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{M}} J(a)$$

a^* – засіб із максимальним інтегральним показником ефективності $J(a)$.

Загальний інтегральний критерій оцінки відповідності ЗМР завданням охорони і захисту об'єктів МКІ запишемо у вигляді:

$$J(a) = \sum_{k=1}^n w_k \cdot F_k(a);$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1,$$

де: $F_k(a)$ – нормований критерій ефективності для засобу a за показником k ;
 w_k – ваговий коефіцієнт важливості показника k .

Введемо у розгляд наступні шість ключових критеріїв ефективності застосування ЗМР.

1. Критерій охоплення акваторії – при виконанні пошукових підводних робіт (пошук ознак порушень нормального функціонування об’єкта МКІ або пошук несанкціоновано розміщених підводних предметів) важливо забезпечити широке та рівномірне покриття підводного простору пошуковими приладами:

$$F_1(a) = \frac{v_a \cdot B_a}{(v \cdot B)_{\max}},$$

де: v_a – ефективна швидкість пересування a – го виду ЗМР;

B_a – ширина ефективного сенсорного покриття пошукового приладу;

$(v \cdot B)_{\max} = \max_{a \in \mathcal{M}} v_a B_a$.

2. Критерій імовірності виявлення загрози об’єкту МКІ:

$$F_2(a) = \frac{P_d(a)}{P_d^{\max}};$$

$$P_d(a) = 1 - \exp(-\lambda_a \cdot t_c(a)),$$

де: λ_a – інтенсивність спостереження для a – го виду ЗМР;

$t_c(a)$ – середній час контакту сенсора із потенційною загрозою;

$P_d^{\max} = \max_{a \in \mathcal{M}} P_d(a)$.

3. Критерій точності локалізації виявленої загрози, який є важливим при охороні мілководних акваторій:

$$F_3(a) = \frac{1}{1 + \sigma_a},$$

де: σ_a – середньоквадратична похибка визначення координат загрози для засобу a – го виду ЗМР.

4. Критерій доступності та маневреності a – го виду ЗМР:

$$F_4(a) = \frac{N_{\text{достіжн.зон}}(a)}{N_{\text{загальних зон}}},$$

де: $N_{\text{достіжн.зон}}(a)$ – кількість зон на захищеній акваторії, доступних для огляду/реагування засобом a – го виду ЗМР;

$N_{\text{загальних зон}}$ – загальна кількість зон, що потребують моніторингу.

5. Критерій часу реагування на виявлену загрозу засобом a – го виду ЗМР:

$$F_5(a) = \frac{1}{T_{\text{реак}}(a)},$$

де: $T_{\text{реак}}(a)$ – час від виявлення загрози до початку дій з її локалізації/нейтралізації.

6. Критерій автономності a – го виду ЗМР:

$$F_6(a) = \frac{T_{\text{авт}}(a)}{T_{\text{max}}},$$

де: $T_{\text{авт}}(a)$ – автономний час роботи a – го виду ЗМР;

$$T_{\text{max}} = \max_{a \in \mathcal{M}} T_{\text{авт}}(a).$$

Далі, через особливості мілководдя (сильніше віддзеркалення сигналів, обмежена глибина, близькість донної поверхні) можна запропонувати наступні специфічні вагові коефіцієнти w_k для зазначених критеріїв:

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6] = [0.15; 0.25; 0.15; 0.15; 0.20; 0.10],$$

оскільки важливими є висока імовірність виявлення та малий час реагування на загрозу, а також не менш важлива доступність і маневреність ЗМР.

Нижче наведено якісні математичні оцінки для кожного виду ЗМР:

МБНС:

$$\begin{aligned}
 F_1(\text{МБНС}) &= \frac{v_{\text{МБНС}} B_{\text{МБНС}}}{(vB)_{\text{max}}} \text{ — високе,} \\
 F_2(\text{МБНС}) &= \text{середнє (обмежено сенсорами надводної лінії),} \\
 F_3(\text{МБНС}) &= \text{низьке (надводне положення дає меншу точність підводних координат),} \\
 F_4(\text{МБНС}) &= \text{високе,} \\
 F_5(\text{МБНС}) &= \text{високе (швидка передача даних),} \\
 F_6(\text{МБНС}) &= \text{середнє.}
 \end{aligned}$$

АНПА:

$$\begin{aligned}
 F_1(\text{АНПА}) &= \text{середнє,} \\
 F_2(\text{АНПА}) &\approx \text{високе (власні сенсори під водою),} \\
 F_3(\text{АНПА}) &= \text{високе,} \\
 F_4(\text{АНПА}) &= \text{середнє,} \\
 F_5(\text{АНПА}) &= \text{середнє,} \\
 F_6(\text{АНПА}) &= \text{середнє–високе.}
 \end{aligned}$$

СППА:

$$\begin{aligned}
 F_1(\text{СППА}) &= \text{низьке,} \\
 F_2(\text{СППА}) &= \text{дуже високе (детальне дослідження),} \\
 F_3(\text{СППА}) &= \text{дуже високе,} \\
 F_4(\text{СППА}) &= \text{високе (міліводдя дає доступність дна),} \\
 F_5(\text{СППА}) &= \text{високе (оперативна інспекція),} \\
 F_6(\text{СППА}) &= \text{низьке (обмеження тривалості роботи).}
 \end{aligned}$$

БПА:

$$\begin{aligned}
 F_1(\text{БПА}) &= \text{високе,} \\
 F_2(\text{БПА}) &= \text{середнє,} \\
 F_3(\text{БПА}) &= \text{середнє,} \\
 F_4(\text{БПА}) &= \text{низьке (закриті зони, мілководдя),} \\
 F_5(\text{БПА}) &= \text{низьке (повільний відгук),} \\
 F_6(\text{БПА}) &= \text{високе (життєвий цикл).}
 \end{aligned}$$

Підставивши оцінки $F_k(a)$ у загальний інтегральний критерій:

$$J(a) = 0.15F_1(a) + 0.25F_2(a) + 0.15F_3(a) + 0.15F_4(a) + 0.20F_5(a) + 0.10F_6(a),$$

отримуємо наступні результати:

- МБНС добре підходить для моніторингу надводної частини акваторії і для комунікації з БЦК, але дещо гірші у порівнянні з підводними апаратами-роботами при виявленні підводних загроз об'єктам МКІ;

- АНПА має баланс між операціями з виявлення підводних загроз об'єктам МКІ, та операціями з локалізації загроз і автономністю ЗМР;

- СППА має найкращі показники ефективності для детальної ідентифікації загроз та реагування на них;

- ефективність БПА в мілководді знижується через обмеження маневреності та доступності.

Таким чином, з урахуванням інтегрального оцінюючого критерію $J(a)$:

$$a^* = \arg \max_{a \in \mathcal{M}} J(a),$$

для об'єктів МКІ, які знаходяться на мілководних акваторіях України ($\leq 80\text{--}100$ м) найдоцільнішим буде застосування АНПА та СППА.

У цілому, аналізуючи ефективність засобів підводної робототехніки (ЗПР) з позицій системного підходу, констатуємо, що БПА виконують функцію високопродуктивного сенсорного рівня [14], тоді як АНПА та СППА — рівні детального обстеження та активного реагування на загрози об'єктам МКІ [15, 16].

Таким чином, сучасні ЗМР, взагалі і ЗП, зокрема, демонструють ознаки технологічної зрілості для впровадження новітніх морських роботизованих технологій у завдання охорони об'єктів МКІ, але все ще мають суттєві технічні та операційні обмеження.

Виходячи з проведеного аналізу, до перспективних напрямків розвитку роботизованих технологій охорони та безпеки об'єктів МКІ відносяться:

- створення морських роботизованих систем, які об'єднують експлуатаційні властивості АНПА та СППА для оперативного висвітлення підводної обстановки на об'єктах МКІ, розташованих на мілководних акваторіях;

- розвиток технологій автономної адаптації і машинного навчання для підвищення здатності до самостійного ухилення від перешкод, виявлення та класифікації загроз для об'єктів МКІ;

- удосконалення засобів зв'язку між ЗПР та БЦК для забезпечення режиму «присутності під водою» для берегових операторів безпеки об'єктів МКІ.

Далі розглянемо варіант побудови ЗПР, який має поєднувати переваги АНПА і СППА при виконанні місій охорони і захисту об'єктів МКІ.

1.3 Автономний ненаселений підводний апарат з буксируваним радіобуєм як сучасний інструмент охорони об'єктів морської критичної інфраструктури

Сучасні тенденції розвитку морської робототехніки вказують на підвищення ролі АНПА у сфері охорони та захисту об'єктів МКІ. Проте навіть найрозвиненіші зразки АНПА стикаються з низкою обмежень, що знижують їхню ефективність у реальних умовах морського середовища - насамперед, це відсутність стабільного зв'язку з береговими або судновими центрами керування та обмежений запас енергії для тривалих місій.

Перспективним напрямом розвитку є створення двохланкових автономних систем типу АНПА з буксируваним радіобуєм, у яких поєднано переваги автономності та оперативного інформаційного зв'язку з БЦК [17]. Такі системи здатні формувати мережі морського моніторингу, інтегровані в єдину систему охорони об'єктів МКІ [18].

1.3.1. Концепція АНПА з радіобуєм.

Одним із перспективних напрямів подолання цих обмежень є розробка двохланкових автономних систем типу «Автономний ненаселений підводний апарат – буксируваний радіобуй (АНПА-РБ) [19-21], у яких автономний апарат виконує основну підводну місію, а радіобуй забезпечує постійний двосторонній зв'язок із береговим центром керування (БЦК) або судном-носієм (рис. 1.6).

Такі системи поєднують у собі переваги “класичного” АНПА (автономність дій, віддаленість від оператора, можливість роботи на великих глибинах) і “класичного” СППА - оперативний контроль з боку людини, можливість змінювати параметри місії у реальному часі, а також отримувати дані моніторингу в момент виконання завдання.

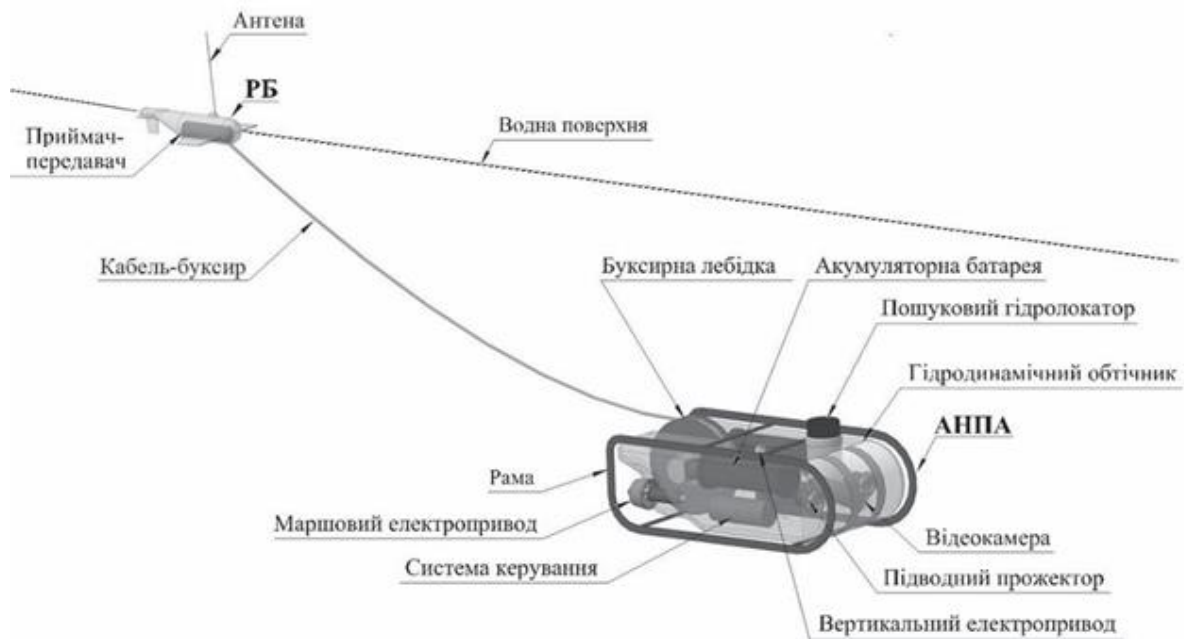


Рисунок 1.6. - Автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм

АНПА-РБ може бути оснащений різними типами пошукової, гідроакустичної та навігаційної апаратури, що забезпечує виконання таких завдань:

- моніторинг стану об'єктів МКІ (трубопроводів, кабелів, паливних і гідротехнічних конструкцій);
- виявлення сторонніх об'єктів або ознак диверсійної діяльності у контрольованій акваторії;
- екологічний контроль параметрів морської води та виявлення забруднень;
- оперативна передача даних до БЦК через радіоканал зв'язку;
- участь у місіях технічного обслуговування або аварійного реагування у складі групи морських роботів різного класу.

Унікальністю системи АНПА-РБ є гідродинамічна інтеграція радіобуя у конструкцію апарата. У транспортному положенні буй входить до складу корпусу апарата як обтічний елемент, а в робочому положенні — розгортається на буксируванні, виконуючи функції антенної платформи для зв'язку.

1.3.2. Конструктивно-гідродинамічні особливості АНПА з радіобуєм.

Корпус радіобуя, а саме дугові крила, повторює форму корпусу АНПА, що поєднує функції підйомної поверхні та гідродинамічного стабілізатора (рис. 1.7).

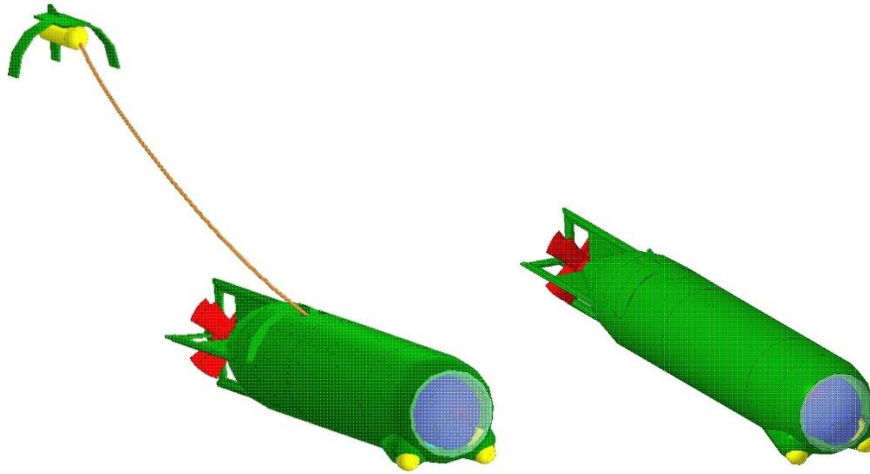


Рисунок 1.7 – Автономний підводний апарат з буєм зв'язку

Така форма забезпечує:

- зменшення гідродинамічного опору автономного ненаселеного підводного апарата у режимі без радіозв'язку з береговим центром керування (РБ знаходиться у згорнутому положенні);
- покращення стійкості буксируваного радіобуя на хвилюванні;
- компактність конструкції під час транспортування, спуску на воду та підйому з води;
- зменшення часу розгортання системи в робоче положення.

Розробка систем типу АНПА-РБ дозволяє створити новий клас морських роботів, придатних для:

- довготривалого моніторингу об'єктів МКІ у режимі постійного зв'язку з БЦК;
- зниження навантаження на судна-носії завдяки автономності апарата;
- інтеграції у багаторівневі автоматизовані системи охорони акваторій, де поєднуються морські, повітряні та берегові компоненти спостереження;
- оперативного реагування на виявлені загрози без залучення водолазів.

Ефективне функціонування системи АНПА-РБ визначається взаємодією її двох ланок — підводного апарата та буксируваного радіобуя, з'єднаних гнучким зв'язком — кабель-буксиром (КБ). Ця взаємодія зумовлює складну гідромеханічну

систему з нелінійними зв'язками, у якій сили інерції, опору, підйомної сили та хвильового збурення взаємодіють у трьох вимірах.

Відсутність на сьогодні узагальнених теоретичних моделей, що достовірно описують рух буксируваних систем типу «підводний апарат - буксирований радіобуй» в умовах хвилювання, течій та змінного кута атаки, значно ускладнює процес проєктування.

1.4 Актуальні задачі механіки та гідромеханіки при проєктуванні автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм та постановка задачі дослідження

1.4.1 Загальні зауваження

Сучасні виклики у сфері охорони та захисту об'єктів МКІ зумовлюють необхідність створення нових класів засобів морської робототехніки, здатних ефективно функціонувати у складних гідрометеорологічних умовах, в умовах обмеженої глибини, інтенсивного судноплавства та високого рівня загроз диверсійного характеру.

Традиційні автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) та самохідні прив'язні підводні апарати (СППА) мають низку обмежень при застосуванні в мілководних акваторіях (на глибинах до 80–100 м), зокрема щодо забезпечення надійного та постійного каналу зв'язку, точного позиціонування та оперативної інтеграції у систему охорони об'єктів МКІ. Використання акустичних каналів зв'язку в таких умовах супроводжується значними втратами інформації, затримками та нестабільністю.

У цьому контексті перспективним є концептуальне рішення, яке передбачає створення автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм (АНПА-РБ), що поєднує автономність підводної платформи з можливістю реалізації високонадійного радіозв'язку через надводний елемент - радіобуй. Таке поєднання обумовлює необхідність розв'язання комплексу взаємопов'язаних задач механіки, гідромеханіки, енергетики та системного

проектування, спрямованих на оптимізацію конструкції, компоновки та режимів руху системи «АНПА – кабель-буксир – радіобуй».

1.4.2 Задачі зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм

Зовнішнє проектування АНПА-РБ має базуватися на аналізі його функціонального призначення як елемента системи охорони МКІ у мілководних зонах та реалізовуватися з використанням системного підходу. У межах такого підходу доцільно виділити чотири взаємопов'язані підмножини завдань.

1) Конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, які мають бути спрямовані на:

- визначення оптимальних обводів корпусу АНПА з урахуванням квазістаціонарних режимів руху;
- обґрунтування компоновки апаратури, рушійного комплексу та системи буксирування радіобуя;
- аналіз гідродинамічної взаємодії між АНПА, КБ та РБ;
- формування вимог до стабільності руху та керованості системи «АНПА–КБ–РБ».

Особливу увагу необхідно приділити мінімізації додаткового опору та збурень, що виникають внаслідок буксирування РБ.

2) Завдання енергетики АНПА-РБ, які мають бути спрямовані на:

- розробку методики оцінки енерговитрат рушійного комплексу АНПА-РБ;
- дослідження впливу режимів періодичного виходу радіобуя на поверхню на загальний енергетичний баланс;
- оцінку економії енергії у порівнянні з режимами постійного радіозв'язку з БЦК;
- визначення допустимих часових інтервалів автономного руху апарата без активного радіозв'язку з БЦК.

3) Інформаційно-комунікаційні завдання та завдання керування, які мають бути спрямовані на:

- оцінку точності позиціонування АНПА-РБ у мілководних умовах плавання;

- обґрунтування архітектури системи зв'язку (радіо-, гідроакустичної, комбінованої);

- аналіз ефективності системи автоматичного керування рухом та стабілізації;
- формування вимог до надійності та завадостійкості інформаційних каналів.

4) Завдання ефективного застосування АНПА-РБ, які мають бути спрямовані на:

- визначення цільового призначення АНПА-РБ у системі охорони МКІ;
- формування переліку основних робіт (патрулювання, інспекція, моніторинг та нейтралізація загроз);

- обґрунтування принципів взаємодії з малорозмірними безекіпажними надводними суднами, іншими АНПА та береговими центрами керування;

- аналіз сценаріїв спільного застосування у складі багатоплатформних систем безпеки.

1.4.3 Задачі внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм.

Для підводних апаратів, що працюють у мілководних акваторіях, ключовим чинником ефективності є глибока інтеграція засобів зв'язку з конструкцією підводного апарата і радіобуя.

Така інтеграція досягається шляхом використання буксированого радіобуя з дуговими несучими поверхнями, геометрично та гідродинамічно узгодженими з формою корпусу АНПА.

Застосування дугових несучих поверхонь дозволяє:

- стабілізувати положення радіобуя відносно поверхні води;
- зменшити динамічні навантаження у буксирному кабелі;
- покращити гідродинамічну узгодженість системи «АНПА–КБ–РБ».

У межах внутрішнього проєктування необхідним є порівняльний аналіз АНПА традиційної конструкції та СППА. За результатами такого аналізу доцільно сформулювати множини їх експлуатаційних властивостей з позицій охорони і захисту об'єктів МКІ, зокрема за критеріями автономності, надійності зв'язку, маневреності та прихованості функціонування.

На основі цього порівняння необхідно сформулювати прикладне науково-технічне завдання внутрішнього проєктування нового виду підводної робототехніки – АНПА-РБ, орієнтованого на охоронні місії у мілководних акваторіях.

Із застосуванням системного підходу необхідно:

- сформувати генеральну множину завдань внутрішнього проєктування АНПА-РБ;
- виокремити підмножину основних наукових задач з механіки та гідромеханіки;
- обґрунтувати їх взаємозв'язок та ієрархію.

Ця сукупність задач має утворити науково-методологічну основу внутрішнього проєктування АНПА-РБ як нового класу засобів морської робототехніки.

1.4.4 Перелік дисертаційних задач

Відповідно до викладеної постановки проблеми, у дисертаційній роботі необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Виконати критичний огляд сучасного стану проєктування та застосування засобів морської робототехніки охоронного призначення.
2. Розробити методологію, а також програмні та апаратні засоби для дослідження АНПА-РБ.
3. Провести дослідження гідродинамічних характеристик дугового крила радіобуя при квазістаціонарному русі системи «АНПА–КБ–РБ».
4. Розробити науково-методологічні основи проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм для охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури у мілководних акваторіях.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи виконано системний аналіз проблематики охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури із застосуванням сучасних засобів морської робототехніки, що дозволило сформулювати науково обґрунтовану постановку задачі дослідження та визначити напрями подальших наукових розробок.

1. Виконано коротку характеристику основних типів об'єктів МКІ, зокрема підводних трубопроводів, кабельних ліній, портових та шельфових споруд, а також визначено специфіку їх розташування у мілководних акваторіях. Показано, що завдання їх охорони мають безперервний, просторово-розподілений характер і потребують застосування спеціалізованих робототехнічних засобів, здатних тривалий час працювати в автономному режимі в умовах складної гідрологічної та навігаційної обстановки.

2. На основі огляду та критичного аналізу сучасних ЗМР встановлено, що автономні ненаселені підводні апарати, самохідні прив'язні підводні апарати, буксировані системи та малорозмірні безекіпажні надводні судна мають як суттєві переваги, так і принципові обмеження при застосуванні у задачах охорони об'єктів МКІ. Зокрема, виявлено суперечність між вимогами до автономності підводних апаратів та необхідністю забезпечення надійного і оперативного зв'язку з береговими центрами керування в мілководних умовах.

3. Показано, що автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм є перспективним гібридним інструментом охорони об'єктів морської критичної інфраструктури, який поєднує переваги автономних підводних платформ із можливістю використання стійких радіоканалів зв'язку. Обґрунтовано доцільність застосування буксированого радіобуя як конструктивного елемента, що забезпечує підвищення ефективності інформаційно-комунікаційної складової без істотного зниження автономності та прихованості функціонування підводного апарата.

4. У результаті аналізу актуальних задач механіки та гідромеханіки встановлено, що проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксированим радіобуєм потребує розв'язання комплексу взаємопов'язаних задач,

обумовлених рухом багатокомпонентної системи «АНПА – кабель-буксир – радіобуй» у морському середовищі. Показано, що ключовими є задачі визначення гідродинамічних характеристик елементів системи, оцінки їх взаємного впливу, забезпечення стійкості та керованості руху, а також оптимізації енергетичних витрат при виконанні охоронних місій.

5. На основі системного підходу сформульовано постановку наукової задачі дослідження, яка полягає у розробці науково-методологічних основ проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм для охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури в мілководних акваторіях. Визначено перелік дисертаційних задач, спрямованих на отримання нових наукових результатів у галузі механіки та гідромеханіки морських рухомих об'єктів.

Отримані у розділі 1 результати створюють концептуальну та методологічну основу для подальшого дослідження АНПА-РБ, зокрема, для аналізу його гідродинамічних характеристик та обґрунтування проєктних рішень.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З БУКСИРУВАНИМ РАДІОБУЄМ

Стрімкий розвиток морської робототехніки обумовлює появу принципово нових технічних об'єктів, які поєднують у собі функції підводного рухомого носія, інформаційно-комунікаційної платформи та енергетично автономної системи тривалої дії. До таких об'єктів належить автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм (АНПА-РБ), який характеризується високим рівнем структурної та функціональної складності, багатоконтурністю систем керування та суттєвою залежністю експлуатаційних характеристик від умов морського середовища.

АНПА-РБ не може бути коректно досліджений у межах окремої вузькоспеціалізованої наукової дисципліни. Його проєктування та аналіз функціонування потребують комплексного та всебічного дослідження із залученням усього спектра сучасної науки «Суднобудування», включаючи теорію корабля, гідромеханіку, міцність корпусів, енергетичні установки, теорію руху та керування суднами, автоматизацію та інформаційні системи морських технічних засобів. Особливістю АНПА-РБ є тісний взаємозв'язок між підводною частиною апарата та надводним (або напівзануреним) радіобуєм, що формує єдину гідродинамічну, енергетичну та інформаційну систему.

Умови експлуатації АНПА-РБ – змінні гідрометеорологічні фактори, наявність течій, хвилювання, обмеження на енергоспоживання та канали зв'язку – вимагають поєднання теоретичних (аналітичних), чисельних та експериментальних методів дослідження. Аналітичні методи забезпечують формування узагальнених математичних моделей руху та енергетики, чисельні методи, зокрема із залученням CFD-технологій, дозволяють уточнити гідродинамічні характеристики окремих складних АНПА-РБ, а експериментальні дослідження (басейнові або натурні) є необхідними для верифікації отриманих моделей та підтвердження їх адекватності реальним умовам експлуатації.

2.1 Постановка задачі

Автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм (АНПА-РБ), призначений для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ) на мілководних морських акваторіях, є складним технічним об'єктом, ефективність створення та застосування якого визначається сукупністю взаємопов'язаних конструктивних, гідродинамічних, енергетичних, інформаційно-комунікаційних та експлуатаційних факторів.

Враховуючи новизну запропонованого типу підводного апарата та особливі умови його функціонування, виникає необхідність формування цілісної методології дослідження, яка забезпечує обґрунтоване прийняття проєктних рішень на всіх етапах проєктування АНПА-РБ.

У межах даного розділу сформулюємо завдання дисертаційного дослідження як розробку та обґрунтування загальної методології зовнішнього і внутрішнього проєктування АНПА-РБ та дослідження гідродинамічних характеристик його ключових елементів, зокрема буксируваного радіобуя, з використанням системного підходу, сучасних аналітичних, чисельних та експериментальних методів суднобудівної науки.

Відповідно до цього сформулюємо наступні три групи завдань:

- завдання зовнішнього проєктування АНПА-РБ для охорони об'єктів МКІ на мілководних акваторіях;
- завдання внутрішнього проєктування АНПА-РБ для охорони об'єктів МКІ;
- завдання дослідження гідродинамічних властивостей дугових несучих поверхонь (крил) буксируваного радіобуя АНПА.

Розглянемо їх більш детально.

Перше завдання – завдання зовнішнього проєктування АНПА-РБ спрямоване на формування загального технічного образу підводного апарата, визначення його функціонального призначення, основних технічних характеристик, принципів застосування та взаємодії з іншими морськими і береговими платформами охоронної системи об'єктів МКІ. Особливістю таких завдань є необхідність

одночасного врахування вимог до підводного руху, стійкості зв'язку, енергетичної автономності та тривалості виконання місій на мілководді.

У зв'язку з цим у необхідно обґрунтувати доцільність застосування системного підходу до зовнішнього проєктування АНПА-РБ [22], який забезпечує комплексний розгляд взаємопов'язаних:

- загальноконструктивних факторів (архітектурно-конструктивний тип АНПА та його РБ, масо-габаритні характеристики, глибина занурення тощо);
- енергетичних факторів (енергоспоживання, автономність, енергетика режимів роботи без зв'язку з БЦК та при наявності такого зв'язку через РБ);
- інформаційно-комунікаційних факторів (навігація АНПА, навігація РБ у режимі його буксирування, пропускна спроможність каналів зв'язку з БЦК тощо);
- експлуатаційних факторів (режими роботи в умовах мілководдя, обмеження маневрування, безпека експлуатації).

Для кількісного обґрунтування прийнятих проєктних рішень у межах зовнішнього проєктування доцільним є застосування методу оцінювання ефективності застосування АНПА-РБ, який дозволяє виконувати порівняльний аналіз альтернативних технічних рішень та визначати технічну доцільність і економічну ефективність проєктування та експлуатації такого апарата у складі систем охорони об'єктів МКІ.

Друге завдання – завдання внутрішнього проєктування АНПА-РБ охоплює формування складу, структури та принципів взаємодії основних функціональних підсистем підводного апарата у межах єдиної інтегрованої системи. З урахуванням умов експлуатації на мілководних морських акваторіях, ключовим є забезпечення узгодженого функціонування таких підсистем:

- енергетичної;
- рушійно-рульової;
- навігаційної та позиціонування;
- інформаційної та обчислювальної;
- телеметричної та комунікаційної (зокрема, через буксирований РБ);
- системи автоматичного керування АНПА-РБ.

Тут необхідно обґрунтувати необхідність застосування методології системного підходу до внутрішнього проєктування виду морської робототехніки, яка має змогу:

- врахувати взаємний вплив підсистем на загальні енергетичні та динамічні характеристики апарата;
 - забезпечити структурну та функціональну сумісність обладнання;
- досягти виконання цільових функцій апарата з необхідним рівнем надійності, автономності та інформаційної стійкості під час виконання охоронних місій.

Третє завдання – завдання дослідження гідродинамічних властивостей дугових несучих поверхонь буксированого РБ обумовлене тим, що радіобуй має дугові несучі поверхні, які геометрично та гідродинамічно узгоджені з формою корпусу АНПА.

Таке конструктивне рішення покликане забезпечити зменшення додаткового гідродинамічного опору системи АНПА-РБ та мінімізацію збурюючого впливу на рух АНПА у режимах руху без радіозв'язку, а також стабільне положення РБ при його буксируванні у приповерхневому шарі моря.

У зв'язку з цим актуальним є завдання дослідження гідродинамічних характеристик дугових несучих поверхонь РБ, яке доцільно виконувати:

- з використанням сучасних методів комп'ютерного 3D-проєктування та цифрового прототипування;
- з залученням чисельних методів гідродинаміки (CFD-моделювання) для аналізу режиму квазістаціонарного обтікання;
- на основі експериментальних досліджень у дослідницьких басейнах або гідролотках з метою верифікації чисельних моделей.

Результати таких досліджень мають підтвердити можливість та доцільність використання таких несучих поверхонь у складі АНПА-РБ і стати основою для оптимізації геометрії радіобуя та забезпечення гідродинамічної узгодженості всієї системи «АНПА – КБ – РБ».

Загальна схема дисертаційного дослідження у рамках наведених трьох завдань наведена на рис. 2.1.

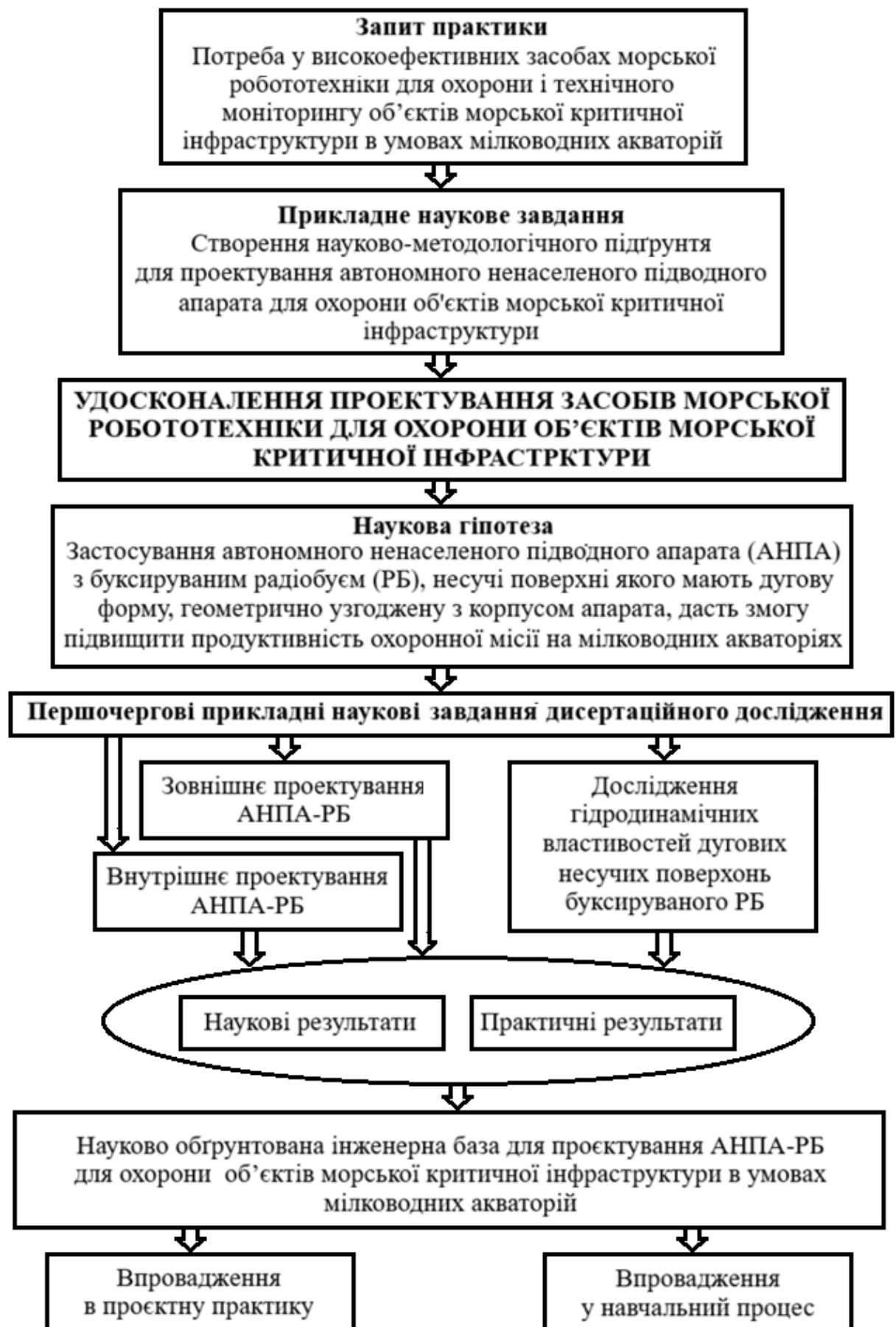


Рисунок 2.1 – Загальна схема дослідження

Таким чином, сформульований вище перелік завдань визначає логіку та структуру подальшої роботи і створює науково-методологічну основу для комплексного дослідження та проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм як перспективного засобу охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях.

2.2 Теоретичні методи дослідження та проєктування засобів підводної робототехніки

Теоретичні методи дослідження та проєктування займають ключове місце у формуванні науково обґрунтованої методології створення засобів підводної робототехніки, зокрема автономних ненаселених підводних апаратів з радіобуєм, призначених для охорони об'єктів МКІ. Застосування теоретичних методів дозволяє здійснювати системний аналіз, синтез та оптимізацію технічних рішень на ранніх етапах проєктування, зменшуючи обсяг дорогих експериментальних робіт і підвищуючи прогнозованість експлуатаційних характеристик апарата.

Теоретичні методи у підводній робототехніці базуються на поєднанні положень теорії систем, механіки суцільних середовищ, теорії автоматичного керування, теорії ймовірностей та оптимізації, а також методів математичного моделювання складних технічних об'єктів.

2.2.1 Системне представлення і функціональна декомпозиція задачі

Системний підхід передбачає розгляд будь-якого засобу морської робототехніки як ієрархічної цілісної системи, що складається з взаємозалежних підсистем (гідродинамічна, енергетична, навігаційно-керуюча, сенсорна, інформаційно-комунікаційна, тощо) [23]. Такий підхід дає змогу виділити ключові функції кожної підсистеми та формалізувати їх взаємодію між собою, а також побудувати структурну модель об'єкта проєктування.

При цьому використовується наступний математичний апарат: теорія систем; функціонально-структурні діаграми, циклограми роботи ЗМР, взаємодії та залежностей між підсистемами.

Тобто, підводний робот розглядається як сукупність взаємопов'язаних модулів, коли системна архітектура описується на рівні функціональних блоків, що узгоджуються між собою за вимогами місії та середовища експлуатації [24].

Особливості застосування системного підходу до проєктування АНПА-РБ розглядаються у п.р. 2.3.

2.2.2. Формалізація критеріїв ефективності

Критерії ефективності є кількісними показниками, що дозволяють оцінити роботу підсистем підводного апарата щодо заданих технічних та експлуатаційних вимог. До основних критеріїв належать:

- продуктивність;
- енергоефективність;
- навігаційна точність;
- інформаційна ефективність;
- надійність та живучість.

Ці критерії формуються на основі математичних моделей і вводяться як цільові функції у задачі оптимізації. При цьому використовують багатокритеріальну оптимізацію, теорію імовірностей та аналіз чутливості параметрів.

У сучасних роботах багато уваги приділено багатокритеріальній оптимізації конструкцій підводних роботів з урахуванням взаємопов'язаних показників продуктивності [25].

Особливості формування і критеріїв ефективності при проєктуванні АНПА-РБ розглядаються у п.р. 2.4.

2.2.3 Математичне моделювання динаміки підводних апаратів

Математичне моделювання є основою наукового дослідження та проєктування підводних апаратів. Воно дозволяє формалізувати фізичні закономірності руху підводного апарата, взаємодії із середовищем, вплив гідродинамічних сил і моментів, а також визначити динамічні характеристики, необхідні для синтезу систем керування та оцінки продуктивності апарата. Такі моделі виконують ключові функції:

- формуються системи рівнянь руху в шести ступенях свободи підводного апарата;
- розраховуються його гідродинамічні коефіцієнти;
- будуються та досліджуються моделі взаємодії з течіями, хвильовими збуреннями тощо;
- формуються прогнози траєкторій та маневреності підводного апарата.

Математичне моделювання є необхідним етапом перед чисельними та експериментальними дослідженнями, оскільки дозволяє зменшити кількість фізичних випробувань та оптимізувати конструкцію апарата на ранніх стадіях проєктування.

Класичний підхід до моделювання руху підводних апаратів ґрунтується на базових принципах механіки твердого тіла в середовищі з гідродинамічним опором. Динаміка руху зазвичай описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, що включає:

- кінематику та кінетику у шести ступенях свободи (6 DOF): поступальні та обертальні рухи;
- вплив інерційних сил та моментів;
- опис гідростатичних сил та моментів;
- опис гідродинамічного опору та підйомної сили.

У цих моделях рух підводного апарата формалізується через узагальнені координати та швидкості, а гідродинамічні сили представляються через чисельно або емпірично визначені коефіцієнти, що залежать від форми корпусу та режимів руху [26, 27]. Такі моделі включають динамічні рівняння руху тіла в рідині та поля швидкостей/тисків, які можуть бути наближено описані або аналітично, або через параметричні моделі.

2.2.3.2. Методи CFD-моделювання процесів обтікання

CFD (Computational Fluid Dynamics) — це чисельний метод, який дозволяє розв'язувати рівняння руху рідини Нав'є-Стокса, описуючи потік води навколо 3D-моделі АНПА або окремих елементів (корпус, рулі, несучі поверхні) [28].

CFD-моделювання має важливе значення для:

- оцінки гідродинамічних сил і моментів та визначення коефіцієнтів опору, підйому та моментів, необхідних для розрахунку динаміки руху АНПА;
- оптимізації форми корпусу та розміщення кермових та несучих поверхонь;
- аналізу локальних полів швидкостей та тисків на елементи конструкції АНПА.

Огляд сучасних стратегій CFD-досліджень для гідродинаміки AUV показує, що ці методи стали визнаним інструментом при оптимізації форми, оцінюванні силових впливів на тверді тіла при їх обтікання потоком води [29].

У даному дисертаційному дослідженні технології CFD-моделювання доцільно залучати до розв'язку Завдання 3 – дослідженню гідродинамічних властивостей дугових несучих поверхонь буксируваного РБ (див. Розділ 3).

2.3 Системний підхід на етапі проєктування АНПА-РБ

Розробка сучасних засобів морської робототехніки для охорони об'єктів МКІ потребує застосування комплексної, науково обґрунтованої методології дослідження, що враховує багатофакторність умов функціонування АНПА-РБ. Такі апарати функціонують у складному морському середовищі, характеризуються наявністю взаємопов'язаних механічних, гідродинамічних, енергетичних та інформаційних процесів, а також жорсткими вимогами до надійності, автономності та інформаційної стійкості.

Науковою основою методології є системний підхід, який дозволяє розглядати АНПА-РБ у єдності його матеріальної, енергетичної, інформаційної та функціональної складових.

Застосування системного підходу передбачає декомпозицію АНПА-РБ на взаємопов'язані підсистеми та аналіз їх функціонування за чотирма базовими критеріями [23].

2.3.1. Критерій «Матерія» (конструктивна складова проєкту), який у межах даного критерію розглядає АНПА-РБ як матеріальний об'єкт, що включає:

- корпус обраної гідродинамічної форми АНПА;

- рушійно-рульові пристрої (РРП) АНПА;
- систему розміщення та застосування за призначенням РБ;
- корпус та несучі поверхні обраних гідродинамічних форм РБ.

Проектування має бути спрямоване на визначення геометричних, масо-габаритних та гідродинамічних характеристик АНПА-РБ, які безпосередньо впливають на стійкість, керованість і маневреність апарата.

Проектування за даним критерієм доцільно проводити, спираючись на рівняння існування для мас і об'ємів АНПА [30]:

$$M_{\text{АНПА}} = \sum_{i=1}^n m_{Ai} + \sum_{j=1}^k m_{Bk} \leq M_{\text{АНПАТЗ}}; \quad (2.1)$$

$$V_{\text{АНПА}} = \sum_{i=1}^n v_{Ai} + \sum_{j=1}^k v_{Bk} \leq V_{\text{АНПАТЗ}}, \quad (2.2)$$

де $\sum_{i=1}^n m_{Ai}$ – сумарна маса елементів постійного складу АНПА (елементи конструкції рами та плавучості, герметичні корпуси електрообладнання, інформаційно-навігаційний та рушійно-кермовий пристрій, РБ та обладнання для цього застосування за призначенням, штатно встановлені фото-, відео- та гідроакустичні прилади тощо);

$\sum_{j=1}^k m_{Bk}$ – маса елементів змінюваного навісного обладнання АНПА, яке призначене для протидії виявленим загрозам для об'єктів МКІ (пошуково-вимірювальні прилади, підводні маніпулятори тощо);

$M_{\text{АНПА-ТЗ}}$, $V_{\text{АНПА-ТЗ}}$ – відповідно, маса та об'єм АНПА, задані у технічному завданні на проектування (ТЗ);

n , k – кількість елементів АНПА, відповідно, постійного та змінюваного складу.

Для РБ мають складатись рівняння існування за аналогічною структурою, але лише з переліком елементів РБ постійного складу, оскільки радіобуй виконує лише функції зв'язку з БЦК.

2.3.2. Критерій «Енергія» (енергетична складова проєкту), згідно з яким енергетична система АНПА-РБ визначає можливість тривалої автономної роботи. Проєктування на ранніх стадіях проєкту включає:

- аналіз джерел енергії та балансу споживання між рушіями, бортовою електронікою, сенсорами та РБ;
- оцінювання енергоефективності режимів руху АНПА-РБ та інформаційного обміну між РБ та БЦК.

Проєктування за даним критерієм доцільно проводити, спираючись на рівняння існування для енергетичного балансу АНПА-РБ [31]:

$$P_{\text{АНПА-РБ}} = (\Sigma P_{\text{Const}} + \Sigma P_{\text{ЗНО}} + \Sigma P_{\text{РРП}} + \Sigma P_{\text{РБ}}) \leq P_{\text{АНПА-РБ-ТЗ}}, \quad (2.3)$$

де: ΣP_{Const} – сума потужностей складових, які отримують енергоживлення на протязі всього часу проведення місії АНПА-РБ;

$\Sigma P_{\text{ЗНО}}$ – суми потужностей змінного навісного обладнання АНПА, яке призначене для реалізації функцій інформаційної та енергетичної протидії виявленим загрозам для об'єктів МКІ;

$\Sigma P_{\text{РРП}}$ – сума потужностей електроприводів рушійно-рульового пристрою АНПА;

$P_{\text{АНПА-РБ-ТЗ}}$ – потужність АНПА-ТЗ, яка задана у ТЗ.

Очевидно, що числові значення потужностей мають обиратись з найбільш енергоємних режимів роботи АНПА-РБ.

2.3.3. Критерій «Інформація» (інформаційна складова проєкту), який передбачає, що АНПА-РБ функціонує в умовах обмежених можливостей каналів зв'язку, а його інформаційна модель, по аналогії з [30], включає:

- інтенсивність внутрішніх інформаційних потоків між датчиками, обчислювальними модулями та виконавчими механізмами АНПА $I_{\text{АНПА}}$, які забезпечують його функціонування у нормальних і аварійних режимах

- інтенсивність зовнішніх інформаційних потоків $I_{\text{АНПА-РБ}}$ між АНПА та РБ за допомогою кабель-буксиру;

- інтенсивність зовнішніх інформаційних потоків $I_{\text{РБ-БЦК}}$ між РБ та БЦК.

Очевидно, що рівняння існування АНПА-РБ за критерієм «Інформація» доцільно складати у формі системи рівнянь (нерівностей) трьох типів:

- рівнянь (нерівностей), які характеризують інтенсивність інформаційного обміну всередині АНПА:

$$\sum I_{\text{АНПА}} \geq I_{\text{АНПА-ТЗ}}; \quad (2.4)$$

рівнянь (нерівностей), які характеризують інтенсивність інформаційного обміну по кабель-буксиру між АНПА та його РБ:

$$\sum I_{\text{АНПА-РБ}} \geq I_{\text{АНПА-РБ-ТЗ}}; \quad (2.5)$$

та рівнянь (нерівностей), які характеризують інтенсивність інформаційного обміну між РБ і БЦК:

$$\sum I_{\text{РБ-БЦК}} \geq I_{\text{РБ-БЦК-ТЗ}}, \quad (2.6)$$

де: $I_{\text{АНПА-ТЗ}}$, $I_{\text{АНПА}}$ та $I_{\text{АНПА}}$.

Тобто, проєктна інтенсивність інформаційних потоків має бути меншою, ніж задана у ТЗ.

2.3.4. Критерій «Корисна функція» (експлуатаційна складова проєкту), який оцінює відповідність АНПА-РБ вимогам ТЗ щодо основних експлуатаційних показників АНПА-РБ:

- ефективності охорони та моніторингу об'єктів МКІ;
- тривалості автономної роботи;
- точності навігації АНПА-РБ;
- стабільності радіозв'язку з БЦК.

Синтез аналітичних залежностей для обчислення наведених вище та, за необхідності, інших експлуатаційних показників є окремою прикладною науково-технічною задачею і тут не розглядається.

У загальному вигляді рівняння існування АНПА-РБ за критерієм «Корисна функція» доцільно складати у формі системи наступних аналітичних відношень [30]:

$$J_{OM} \geq J_{OM-T3}; \quad (2.7)$$

$$J_A \geq J_{A-T3}; \quad (2.8)$$

$$J_H \geq J_{H-T3}; \quad (2.9)$$

$$J_3 \geq J_{3-T3}; \quad (2.10)$$

де J_{OM} , J_A , J_H , J_3 – кількісні показники (відповідно, ефективність охорони, автономність, навігація і зв'язок) поточного варіанту АНПА-РБ за критерієм «Корисна функція»;

J_{OM-T3} , J_{A-T3} , J_{H-T3} , J_{3-T3} – значення відповідних показників експлуатаційної ефективності АНПА-РБ згідно до вимог ТЗ.

Констатуємо, що відношення (2.1)-(2.10) утворюють зручний інструментарій для дослідників та проєктувальників ЗМР, оскільки дають змогу оцінювати відповідність поточного варіанту АНПА-РБ вимогам ТЗ вже на ранніх етапах їх проєктування.

2.4 Формалізація цільових функцій та критеріїв ефективності АНПА-РБ у порівнянні з АНПА, СППА та БПА традиційної конструкції

2.4.1. Базові цільові функції. Проєктування АНПА-РБ як складної технічної системи доцільно розглядати як багатокритеріальну задачу оптимізації, у якій технічні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні показники взаємопов'язані та часто знаходяться у протиріччі.

У зв'язку з цим загальна мета проєктування АНПА-РБ формалізується через систему цільових функцій і критеріїв ефективності, які забезпечують обґрунтований вибір конструктивних і функціональних рішень.

2.4.1. Загальна цільова функція проєктування АНПА-РБ

Узагальнену задачу проєктування АНПА-РБ можна подати у вигляді:

$$\max_{\mathbf{X}} J_{\text{АНПА-РБ}} = \{\eta_{\text{func}}, \eta_{\text{energy}}, \eta_{\text{info}}, \eta_{\text{hydro}}, \eta_{\text{econ}}\},$$

де: $\mathbf{X}$ – вектор проєктних параметрів АНПА-РБ (геометрія корпусу, масо-габаритні характеристики, параметри рушійної системи, характеристики РБ, КБ тощо);

η_i – нормовані критерії ефективності за відповідними напрямками.

2.4.1.2. Цільові функції зовнішнього проєктування:

функціональна ефективність застосування відображає здатність АНПА-РБ виконувати задані охоронні місії:

$$\eta_{\text{func}} = \frac{T_{\text{mission}} \cdot P_{\text{det}}}{T_{\text{req}}},$$

де: T_{mission} – фактична тривалість автономної місії;

T_{req} – задана тривалість місії;

P_{det} – імовірність виявлення загроз або подій біля об'єкта МКІ;

інтегральна ефективність застосування використовується для порівняльної оцінки альтернативних засобів морської робототехніки:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{E_{\text{use}}}{C_{\text{life}}},$$

де: E_{use} – корисний ефект від застосування АНПА-РБ (покрита зона охорони, кількість контрольованих об'єктів, час безперервного моніторингу);

C_{life} – приведені витрати за життєвий цикл АНПА-РБ.

2.4.1.3. Цільові функції внутрішнього проєктування:

енергетична ефективність

$$\eta_{\text{energy}} = \frac{E_{\text{useful}}}{E_{\text{total}}},$$

де: E_{useful} – енергія, витрачена безпосередньо на виконання цільових функцій;
 E_{total} – сумарний запас енергії АНПА-РБ.

У розгорнутому вигляді:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{prop}} + E_{\text{control}} + E_{\text{nav}} + E_{\text{comm}} + E_{\text{payload}}.$$

інформаційна ефективність та надійність зв'язку

$$\eta_{\text{info}} = \frac{R_{\text{stable}}}{R_{\text{max}}} \cdot P_{\text{link}},$$

де: R_{stable} – гарантована швидкість передавання даних через радіобуй;
 R_{max} – максимально можлива швидкість інформаційного обміну з БЦК;
 P_{link} – імовірність збереження стійкого зв'язку між АНПА-РБ та БЦК.

2.4.1.4. Гідродинамічні критерії ефективності:

мінімізація гідродинамічного опору системи

$$\min C_D^{\text{sys}} = C_D^{\text{ANPA}} + C_D^{\text{cable}} + C_D^{\text{RB}},$$

де: C_D – коефіцієнти гідродинамічного опору елементів системи;
стабільність руху системи «АНПА – кабель-буксир – радіобуй»

$$\eta_{\text{hydro}} = 1 - \frac{\sigma_{\theta}}{\theta_{\text{lim}}},$$

де: σ_{θ} – середньоквадратичне відхилення кутового положення РБ;
 θ_{lim} – гранично допустиме відхилення РБ.

2.4.1.5. Економічна ефективність:

$$\eta_{\text{econ}} = \frac{C_{\text{alt}} - C_{\text{АНПА-РБ}}}{C_{\text{alt}}},$$

де: C_{alt} – витрати на застосування альтернативних засобів (СППА, БПА);
 $C_{\text{АНПА-РБ}}$ – витрати на застосування АНПА-РБ.

2.4.1.6. Узагальнена багатокритеріальна постановка задачі проектування АНПА-РБ) має вигляд:

$$\mathbf{X}^* = \arg \max_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^n w_i \eta_i(\mathbf{X}),$$

де: w_i – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети охоронної місії та умов експлуатації на мілководних акваторіях.

Таким чином, запропонована система цільових функцій і критеріїв ефективності створює єдину формалізовану основу для:

зовнішнього та внутрішнього проектування АНПА-РБ;

порівняльного аналізу з АНПА, СППА і БПА традиційних конструкцій.

2.4.2. Приклад прив'язки критеріїв ефективності АНПА-РБ до типового об'єкта МКІ «Підводний газопровід». Для підводного газопроводу характерні: лінійна протяжність L_{pipe} , охоронна смуга шириною B_{sec} , складний донний рельєф, наявність сторонніх об'єктів і ризику диверсійного впливу.

Типові задачі АНПА-РБ: безперервне патрулювання, виявлення аномалій, передача тривожних повідомлень у реальному часі, локалізація інциденту.

2.4.2.1. Цільова функція функціональної ефективності (газопровід):

$$\eta_{\text{func}}^{\text{pipe}} = \frac{L_{\text{cov}}}{L_{\text{pipe}}} \cdot P_{\text{det}}^{\text{pipe}} \cdot \frac{T_{\text{mission}}}{T_{\text{cycle}}},$$

де: L_{cov} – фактично проконтрольована довжина газопроводу за місію;

P_{det}^{pipe} – імовірність виявлення загрози (міни, сторонні ЗМР, розмив ґрунту, витік);

T_{cycle} – заданий цикл патрулювання.

Інтерпретація: максимізується повнота та регулярність контролю лінійного об'єкта.

2.4.2.2. Критерій просторового покриття та траєкторної відповідності:

$$\eta_{traj}^{pipe} = 1 - \frac{1}{L_{cov}} \int_0^{L_{cov}} \frac{|d(s) - d_{ref}|}{d_{lim}} ds,$$

де: $d(s)$ – фактична відстань АНПА до осі газопроводу;

d_{ref} – задана відстань супроводу;

d_{lim} – допустиме відхилення.

Інтерпретація: оцінює точність дотримання «коридору охорони».

2.4.2.3. Енергетична ефективність з урахуванням лінійної місії:

$$\eta_{energy}^{pipe} = \frac{L_{cov}}{E_{prop} + E_{sens} + E_{comm} + E_{ctrl}},$$

де: E_{prop} – енергія пропульсивного комплексу АНПА;

E_{sens} – енергія сенсорів (сонар, відео, хімічний аналіз водного середовища);

E_{comm} – енергія для систем навігації і зв'язку через РБ;

E_{ctrl} – енергія для системи керування АНПА-РБ.

Інтерпретація: максимізація відношення «метри контролю на Джоуль».

2.4.2.4. Критерій інформаційної ефективності та своєчасності оповіщення:

$$\eta_{info}^{pipe} = P_{link} \cdot \exp\left(-\frac{t_{alarm}}{t_{crit}}\right) \cdot \min\left(1, \frac{R_r}{R_{req}}\right),$$

де: t_{alarm} – затримка доставки тривожного повідомлення;

t_{crit} – критично допустима затримка;

— реально досяжна та стабільна швидкість передачі даних, з урахуванням завад у радіоканалі, стану радіолінії «РБ – БЦК» та втрат пакетів і повторних передач;

R_{req} – необхідна швидкість для передачі телеметрії/відео.

Інтерпретація: ключовий критерій для газопроводів у зоні ризику диверсійних актів.

2.4.2.5. Гідродинамічний критерій при моніторингу безпеки газопроводу:

$$\min C_D^{\text{pipe}} = C_D^{\text{ANPA}}(Re, Fr) + C_D^{\text{RB}}(\alpha) + C_D^{\text{cable}}(V),$$

де: α – кут атаки дугових поверхонь радіобуя;

V – швидкість патрулювання.

Інтерпретація: мінімізація опору під час тривалого руху вздовж лінійного об'єкта.

2.4.2.6. Критерій стійкості положення радіобуя (зв'язок):

$$\eta_{\text{stab}}^{\text{RB}} = 1 - \frac{\sigma_h}{h_{\text{lim}}} - \frac{\sigma_\theta}{\theta_{\text{lim}}},$$

де: σ_h – дисперсія глибини радіобуя;

σ_θ – кутові коливання;

$h_{\text{lim}}, \theta_{\text{lim}}$ – допустимі межі.

Інтерпретація: забезпечення стабільного радіоканалу над газопроводом.

2.4.2.7. Критерій ризику пропуску (невиявлення) загрози:

$$\eta_{\text{risk}}^{\text{pipe}} = 1 - P_{\text{miss}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{det},i}),$$

де: i – тип загрози (мінування об'єкта МКІ, виявлення несанкціонованих рухомих об'єктів тощо).

2.4.2.8. Економічна ефективність охорони газопроводу:

$$\eta_{\text{econ}}^{\text{pipe}} = \frac{C_{\text{incident}}^{\text{exp}} - C_{\text{ANPA-RB}}}{C_{\text{incident}}^{\text{exp}}},$$

де: $C_{\text{incident}}^{\text{exp}}$ – очікувані збитки від інциденту без АНПА-РБ;

$C_{\text{ANPA-RB}}$ – витрати на впровадження та експлуатацію системи.

2.3.9. Узагальнена багатокритеріальна функція для газопроводу:

$$\max_x J_{\text{pipe}} = \sum_k w_k \eta_k^{\text{pipe}}, \sum w_k = 1,$$

де: ваги w_k визначаються пріоритетом безпеки газопроводу (зв'язок, ризик, покриття).

Таким чином, запропонована прив'язка критеріїв дозволяє кількісно обґрунтувати доцільність застосування АНПА-РБ саме для охорони підводних газопроводів, виконати порівняння з AUV/ROV/TUV традиційної конструкції та безпосередньо використати ці критерії у моделюванні, енергетичних розрахунках та експериментальних дослідженнях.

2.5 Експериментальні методи дослідження АНПА-РБ

В рамках розробки методології дослідження та проектування АНПА-РБ важливе значення має застосування експериментальних методів дослідження, спрямованих на визначення гідродинамічних характеристик як підводних апаратів у цілому, так і їх окремих нетрадиційних та маловивчених елементів.

На цей час технічне забезпечення таких досліджень складається з дослідних басейнів та гідродинамічних труб різної конструкції, які дають змогу проводити експериментальні дослідження та вимірювати широкий спектр гідродинамічних характеристик [32].

Крім того, у багатьох випадках корисні результати отримують у результаті безпосередніх морських натурних випробувань [33]. Однак на ранніх етапах

проектування, коли підводний апарат ще не готовий до морських випробувань у повному обсязі, частіше використовують дослідні басейни та гідродинамічні труби. Тому розглянемо їх більш детально.

2.5.1. Дослідні басейни.

Дослідний (буксирувальний) басейн — це спеціалізована гідротехнічна споруда, призначена для експериментального дослідження гідродинамічних характеристик суден і підводних апаратів у контрольованих лабораторних умовах. Зазвичай, він являє собою довгий прямолінійний резервуар із водою (довжина — десятки або сотні метрів, значна глибина та ширина), обладнаний:

- буксирувальним візком, що рухається вздовж басейну по рейкових напрямних з регульованою швидкістю;
- системами кріплення моделей суден або підводних апаратів (жорсткі траверси, підвіси, механізми просторового позиціювання);
- вимірювальними датчиками сил і моментів, швидкості, положення та орієнтації;
- системами формування хвиль (за потреби);
- засобами гасіння хвиль та стабілізації потоку для зменшення відбиттів від стінок басейна;
- автоматизованою системою збору та обробки експериментальних даних.

Дослідний басейн призначений для:

- визначення сил опору, підйому та бічних сил, що діють на корпус судна або підводного апарата;
- експериментального визначення гідродинамічних коефіцієнтів, необхідних для побудови математичних моделей руху;
- дослідження маневреності, стійкості та керованості суден і підводних апаратів;
- перевірки та валідації чисельних (наприклад, CFD-пакетів програм) і аналітичних моделей;
- оптимізації форми корпусу та компоновки елементів;
- дослідження режимів руху, характерних для реальної експлуатації.

До найбільш відомих дослідних басейнів світу слід віднести басейни США [34], Канади [35] та інших провідних морських країн світу.

В Україні також є наявності декілька дослідних басейнів. Це басейн Інституту гідромеханіки НАН України [36], басейн Одеського національного морського університету [37] та басейн Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова [38].

Так, дослідний басейн Інституту гідромеханіки НАН України — це унікальний об'єкт в Україні для експериментальних досліджень гідродинаміки суден та їхніх моделей, що дозволяє вивчати опір, стійкість та керованість, а також використовувати його для моделювання різноманітних процесів у водному середовищі для наукових та практичних цілей, як-от у сфері суднобудування чи морської техніки.

Басейн входить до складу «Експериментального комплексу для гідродинамічних досліджень Інституту гідромеханіки НАН України», до складу якого входять ще дві взаємодоповнюючі складові частини — швидкісний гідродинамічний басейн і швидкісна багатоцільова гідродинамічна труба [39].

2.5.2. Гідродинамічні труби.

Гідродинамічні труби являють собою замкнуті канали з циркулюючим потоком води, які дозволяють створювати струмінь рівномірного потоку навколо досліджуваного об'єкта [40, 41]. Ці установки особливо ефективні для випробувань окремих елементів підводних апаратів, таких як гвинти, зовнішні елементи корпусу, обтічники та інші гідродинамічні компоненти при стабільних умовах потоку.

Вони дають змогу вимірювати локальні поля швидкостей, тиску та сили впливу потоку на тіло, а також спостерігати за виникненням турбулентності, кавітації тощо.

2.5.3. Порівняння дослідного басейну і гідродинамічної труби замкнутого типу для гідродинамічних досліджень підводних апаратів.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що ці установки не конкурують, а взаємно доповнюють одна одну.

Так, зазвичай, дослідний басейн орієнтований на інтегральні дослідження підводного апарата як системного об'єкта у квазіреальних умовах руху, у той час, гідродинамічна труба замкнутого типу орієнтована на локальні та детальні дослідження обтікання окремих елементів або спрощених моделей апарата.

До переваг дослідного басейну відносять:

- можливість дослідження моделей підводних апаратів у цілому, включно з корпусом, рушіями, кермовими поверхнями;
- відтворення реалістичних режимів руху (прямолінійний рух, маневри, зміна швидкості);
- визначення інтегральних сил і моментів, необхідних для побудови повної математичної моделі руху;
- можливість дослідження динамічних режимів та взаємодії підсистем;
- висока придатність для валідації моделей керування.

До недоліків застосування дослідного басейну відносять:

- великі габарити та висока вартість експлуатації дослідного басейну та додаткового обладнання;
- обмежені можливості дослідження локальних полів потоку навколо окремих складових АНПА;
- вплив масштабного ефекту при малих моделях;
- складність швидкої зміни конфігурації експерименту.

До переваг гідродинамічної труби замкнутого типу відносять:

- високу стабільність і керованість потоку;
- можливість детального аналізу локальних гідродинамічних процесів; обтікання твердих тіл
- ефективне використання PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) та інших методів візуалізації потоку;
- зручність дослідження окремих елементів (гвинт, кермо, крило, тощо);
- нижчі експлуатаційні витрати порівняно з басейном.

До недоліків гідродинамічної труби замкнутого типу відносять:

- обмежені розміри робочої частини;

- складність моделювання інерційних та маневрових режимів;
- обмежена можливість дослідження повномасштабної взаємодії підсистем підводного апарата;
- вплив стінок каналу на результати експерименту.

Результати порівняння цього обладнання наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння дослідного басейну і гідродинамічної труби

Критерій	Дослідний басейн	Гідродинамічна труба замкнутого типу
Об'єкт дослідження	Повна модель апарата	Окремі елементи, спрощені моделі
Тип потоку	Квазіреальний, нестационарний	Стабілізований, квазистационарний
Дослідження маневрів	Так	Обмежено
Визначення інтегральних сил	Так	Обмежено
Дослідження локальних полів	Обмежено	Так
Візуалізація потоку	Обмежено	Висока
Вартість експлуатації	Висока	Середня/низька
Масштабування результатів	Потребує корекції	Простіше для елементів

2.5.4. Гідродинамічна труба ІГМ НАН України як інструмент дослідження дугової несучої поверхні РБ.

Згідно третьому завданню дисертаційного дослідження (див. п. р. 2.1) дослідженню підлягають гідродинамічні характеристики дугових несучих поверхонь буксированого РБ.

Для визначення коефіцієнтів підйомної сили дугового крила було застосовано біогідродинамічну установку (гідродинамічну трубу) замкнутого типу Інституту гідромеханіки НАН України [42].

Принципова схема установки та її габаритні розміри показано на рис. 2.2.

Гідродинамічна труба змонтована на фундаментній рамі та оснащена електромотором 12 постійного струму з системою керування швидкістю обертання ротора. Труба в плані має форму еліпса з відношенням осей 1:3. Вода в трубі рухається трилопатеvim гвинтом 5 лівого обертання діаметром 400 мм. Швидкість потоку в трубі залежить від її поперечного перерізу та кількості обертів гвинта і регулюється від 0,5 до 25 м/с. Для отримання швидкостей, менших ніж 0,5 м/с, використовується байпасний пристрій 7.

З метою зменшення габаритів труби її привод розташований таким чином, що вісь валопроводу розташовується перпендикулярно до поздовжньої осі робочої частини труби.

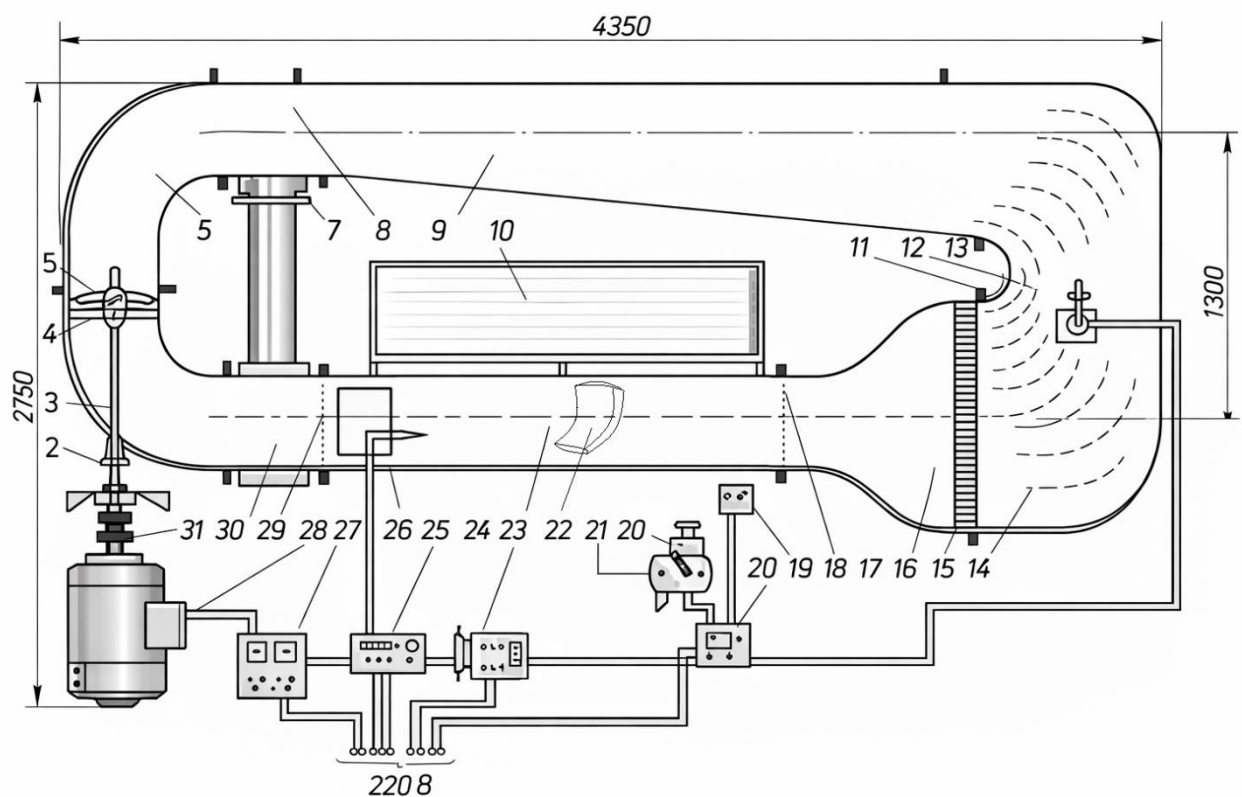


Рисунок 2.2 – Принципова схема експериментальної установки

Вал 3 за допомогою пружної муфти 21 з'єднаний безпосередньо з валом електромотора постійного струму 12. Напруга на електромотор подається з керованого випрямляча струму 11 і змінюється в межах 20-200 В. Випрямляч струму живиться від мережі змінного струму напругою 220 В.

Вал гвинта підтримують внутрішня опора ковзання 4 та зовнішня опора кочення 1. У місці входу валопроводу у внутрішню порожнину труби розташований сальник 2. Трилопатекий гвинт знаходиться в тороподібному поворотному коліні діаметром 416 мм (поворот потоку на 180 град), яке за умовами монтажу опори виконано з двох секцій 20 і 6. Безпосередньо з цим коліном стикуються два геометричні перехідники 8 і 19 від круглого перерізу до квадратного, з'єднаних між собою байпасним пристроєм.

Далі з перехідника вода потрапляє в дифузор 9, кут розширення якого обраний з умови запобігання відриву потоку від стінок. Далі уповільнений втричі потік за допомогою великого поворотного коліна 15 з двома рядами поворотних лопаток 13 і 14 (п'ять і вісім штук відповідно) знову розвертається на 180 град і потрапляє в сопло 17. Для вирівнювання потоку на вході в сопло є хоннейкомбом розмірами отворів 25×25×60 мм.

Робоча частина труби 22 - прямокутна ділянка з внутрішніми розмірами 400×400×1800 мм. Днище виконане з нержавіючої сталі, а верхня та бічні стінки – з десяти міліметрового органічного скла. Кріплення пластин здійснюється потайними латунними болтами. Робоча частина з внутрішньої поверхні по всій своїй протяжності немає виступаючих частин. Робоча частина труби з двох сторін обмежена комірчастою металевою сіткою 18.

На кришці робочої частини труби є прямокутний колодязь (250×350 мм) 10 для завантаження досліджуваних моделей в робочу частину. Під час роботи установки колодязь закривають кришкою. Цей колодязь і невелика спеціальна горловина на великому прямокутному поворотному коліні служать для видалення з труби повітряних бульбашок. Для прискорення процесу деаерації необхідно перед початком роботи протягом 5-8 хвилин прокрутити установку на малих обертах.

Зовнішній вигляд гідродинамічної труби з системою керування показано на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд гідродинамічної труби
з системою керування

Методика експерименту містить наступні чотири етапи:

- калібрування потоку – визначення профіля швидкостей за допомогою термоанемометричної апаратури та визначення тарировка мікроманометром для кожного значення швидкості;
- монтаж дугового крила з фіксованим кутом атаки та встановлення тензодатчиків для вимірювання сил гідромеханічної природи;
- реєстрація руху та силових характеристик дугової несучої поверхні з використанням високошвидкісної відеозйомки;
- аналіз положення і коливання дугової несучої поверхні та обчислення коефіцієнтів підйомної сили та опору дугової несучої поверхні;
- обробка результатів експерименту шляхом порівняння експериментальних даних з результатами CFD-моделювання.

Очікувані переваги від застосування гідродинамічної труби полягають у:

- однорідності водного потоку у робочій частині;
- високих доступних швидкостях потоку;

- можливості тривалої роботи у стаціонарному режимі;
- точності вимірювань, що підтверджено попередніми успішними застосування у гідродинамічних дослідженнях Інституту гідромеханіки НАНУ.

2.5.5. Натурні випробування

2.5.5.1 Сутність натурних випробувань підводної робототехніки.

Натурні випробування — це експериментальні випробування підводних апаратів у реальних морських умовах, за межами лабораторних умов і гідродинамічних моделей.

Основна мета — перевірити роботу конструкційних компонентів, систем керування, зв'язку, бортових датчиків та алгоритмів управління в реальних гідрологічних і гідродинамічних умовах, що не повною мірою імітуються в штучних установках.

Натурні випробування включають:

- реальні статичні та динамічні випробування підводних апаратів за різних глибини та течій;
- оцінювання плавучості, стійкості й поведінки при маневруванні;
- перевірку системи зв'язку та передачі даних, зокрема тривожних повідомлень і телеметрії;
- оцінювання електроживлення та автономності під навантаженням реального середовища;
- тестування сценаріїв роботи в умовах ризику (наприклад, перевірка здатності виявляти аномалії трубопроводу).

Натурні випробування доповнюють результати випробувань у гідродинамічних трубах і дослідних басейнах, оскільки дозволяють оцінювати поведінку підводного апарата в повноцінних природних умовах із впливом хвильної дії, турбулентності, неоднорідностей течій і неоднорідної донної топографії.

2.5.5.2 Методологія натурних випробувань

Основні етапи проведення натурних випробувань:

- планування випробувальних тестів: визначення місць випробувань (море, озеро, спеціальні полігони) та встановлення цілей та критеріїв оцінювання (ефективність сенсорики, зв'язку, автономності);

- підготовка апаратури: калібрування датчиків, забезпечення систем аварійного підйому/повернення підводного апарата, перевірка засобів накопичення та передачі даних.

- проведення випробувань у польових умовах: виконання навігаційних траєкторій, робота в умовах течій, хвиль та інших природних факторів, збір великих масивів даних про працездатність підводного апарата;

- обробка даних та аналіз результатів: зіставлення результатів із моделями та симуляціями, оцінка відхилень і їх причин, а також оптимізація апаратних/програмних рішень.

Порівняльний аналіз експериментальних методів дослідження засобів підводної робототехніки, які на цей час знаходять широке застосування при створення такої техніки, наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 — Порівняння експериментальних методів дослідження

Метод дослідження	Сутність випробувань	Переваги	Недоліки	Призначення для АНПА-РБ
Дослідні басейни (тести в басейнах)	Статичні й динамічні випробування у контрольованому штучному середовищі	Чіткий контроль параметрів середовища Повторюваність експериментів Зручність вимірювання даних	Не враховує повні природні впливи (хвилі, течії)	Корисно на початкових етапах для калібрування моделей та сенсорів

Продовження таблиці 2.2.

Гідродинамічні труби	Імітація потоку води з заданою швидкістю для вимірювання гідродинамічних сил	Можливість точно досліджувати гідродинамічні характеристики Висока точність вимірів	Обмежена модель реального середовища Вартісне обладнання	Оптимально для дослідження рухових властивостей корпусу та спрямованості
Натурні випробування	Тести в реальних морських або природних умовах	Врахування повного спектру природних умов Тестування інтегрованих систем Верифікація реальної працездатності	Складність контролю умов Вища вартість і ризику Потребує логістичної підтримки	Ключовий метод для оцінки ефективності роботи в реальних умовах, включаючи алгоритми управління, зв'язок та автономність

Висновки до розділу 2

У розділі розроблено методологію дослідження АНПА-РБ, що ґрунтується на системному підході та поєднанні аналітичних, чисельних і експериментальних методів. Запропонована методологія створює наукове підґрунтя для удосконалення проєктування АНПА-РБ, призначених для охорони об'єктів МКІ.

Встановлено, що для автономного підводного апарата з радіобуєм дослідні басейни є важливим етапом для калібрування систем сенсорів, перевірки базових характеристик плавучості та систем стабілізації перед виходом у море.

Гідродинамічні труби оптимальні для детального вивчення гідродинамічного опору корпусу та дугових несучих поверхонь.

Натурні випробування є критично необхідними для комплексної перевірки всіх систем у реальних умовах, де проявляються реальні впливи геофізичних факторів, акустичних перешкод, течій та хвильної дії. Саме натурні випробування формують остаточну експертну оцінку відповідності АНПА-РБ технічним і тактичним вимогам до захисту морської критичної інфраструктури.

Однак, на ранніх етапах розробки, коли АНПА-РБ знаходиться на етапах зовнішнього і внутрішнього проєктування, а його окремі складові потребують додаткових досліджень, найбільш доцільними є теоретичні методи дослідження і проєктування, а також дослідження з використанням гідродинамічної труби.

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА З БУКСИРУВАНИМ РАДІОБУЄМ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

3.1 Основні етапи проєктування засобів морської робототехніки охоронного типу

Відомо [43-45], що процес проєктування судна чи будь-якого іншого морського рухомого об'єкта можна умовно розбити на три основні етапи: концептуальне (дослідне), зовнішнє (технічне, попереднє, тендерне) та внутрішнє (детальне, контрактне) проєктування. Розглянемо їх відповідно до завдання створення АНПА-РБ як базового робототехнічного засобу, призначеного для охорони об'єктів МКІ на мілководних акваторіях.

Концептуальне проєктування (Conceptual Design) є початковим етапом створення АНПА-РБ, на якому формується «ідея» майбутнього виробу ЗМР. Метою етапу є формування переліку типових об'єктів МКІ як об'єктів охорони та визначення переліку охоронних робіт на них, порівняльний аналіз можливих типів ЗМР для охорони об'єктів МКІ та обґрунтування базового засобу ЗМР (АНПА-РБ), визначення основних критеріїв ефективності виконання охоронним ЗМР його місії. Результатом проєктування є концептуальна модель (технічна пропозиція) щодо обґрунтованого вибору базового ЗМР охоронного призначення як основа подальшого проєктування.

Зовнішнє проєктування (External Design) розглядає взаємодію обраного ЗМР з об'єктами МКІ як з об'єктами захисту та взаємодію ЗМР з системами захисту верхнього рівня. Метою цього етапу є визначення доцільності створення АНПА-РБ з позицій технологій його застосування за призначенням, формування переліку та особливостей його оснащення, необхідного для виконання охоронних місій.

Внутрішнє проєктування (Internal Design) – це етап деталізації внутрішньої структури та складу охоронного ЗМР як інженерного об'єкта. Метою цього етапу є раціональне компоновання внутрішніх систем у вибраній конструкції апарата.

Таким чином, у результаті концептуального проєктування отримують відповідь на запитання «Для чого створюється АНПА-РБ?», зовнішнього проєктування – «Які принципи побудови АНПА-РБ забезпечують досягнення необхідних експлуатаційних показників?», внутрішнє проєктування – «Як технічно реалізовано АНПА-РБ?».

3.2 Завдання концептуального проєктування морської робототехніки для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на українському шельфі (на прикладі газових та газоконденсатних родовищ)

3.2.1. Загальні зауваження. На шельфі Чорного і Азовського морів у територіальних водах України знаходиться більше десяти газових родовищ та декілька газоконденсатних і нафтових родовищ, що експлуатуються [46]. Крім того, шість родовищ знаходяться у стадії розвідки, облаштування і консервації.

Державна служба геології та надр оцінює балансові запаси природного газу, який може бути видобутий на шельфі Чорного і Азовського морів, на рівні 50 мільярдів кубометрів [47].

Розробка вказаних родовищ передбачає будівництво та експлуатацію морських стаціонарних платформ та магістральних трубопроводів для подачі видобутих енергоносіїв до берегових сховищ. Охорона та утримання у робочому стані вказаних інженерних споруд належить до головних завдань держави.

Засоби морської робототехніки дають можливість суттєво підвищити ефективність робіт з охорони таких об'єктів МКІ [48]. Це робить актуальним прикладне наукове завдання з роботизації технологій охорони та безпеки об'єктів МКІ, які розташовані на українського шельфі Азовського і Чорного морів.

Для формулювання задач створення спеціалізованих технічних засобів роботизації таких робіт на основі системного підходу [22] виконаємо аналіз сучасних технологій охоронного моніторингу технічного стану стаціонарних морських інженерних об'єктів вказаного типу.

3.2.2. Структура типового об'єкта МКІ як об'єкта охорони (на прикладі інженерного комплексу з видобування енергоносіїв на газових та газоконденсатних родовищах). Вивчення існуючих на сьогодні інженерних споруд та виробничих процесів, які використовуються для видобування енергоносіїв (газу та конденсату) на українському шельфі Азовського і Чорного морів показує, що структура типового інженерного комплексу з видобування енергоносіїв IC включає:

- центральні населені морські стаціонарні платформи (Marine Stationary Platforms) MSP з власними свердловинами MSP_B та повним набором надводного MSP_{TS} та підводного MSP_{TU} технологічного устаткування та засобами життєзабезпечення для персоналу MSP_L , який працює на МСП вахтовим методом;
- блок-кондуктори BC (недорогі ненаселені сателітні платформи), оснащені мінімальною кількістю експлуатаційного устаткування – надводного BC_S та підводного BC_U ;
- мережу магістральних P_M та локальних P_L підводних трубопроводів, які з'єднують MSP та BC між собою та забезпечують транспортування енергоносіїв, що видобуваються, до берегових сховищ;
- судна технічного флоту STF для технічного обслуговування інженерного комплексу морських стаціонарних платформ.

Таким чином, множина об'єктів технічного моніторингу комплексу інженерних споруд IC , що експлуатується, містить наступні об'єкти:

$$IC = \{MSP_B; MSP_{TS}; MSP_{TU}; BC; P_M; P_L; STF\}. \quad (3.1)$$

Примітка: тут і далі позначення об'єктів дослідження та позначення множин цих об'єктів як предмету охорони співпадають.

3.2.3. Інформаційна основа для оцінки доцільності залучення конкретних типів морських робіт для охорони та експлуатації об'єктів МКІ. Моніторинг технічного стану підводної частини інженерного комплексу IC включає наступні групи робіт J_{IC} :

- підводне фото-, відео- та гідроакустичне обстеження підводної частини об'єктів МКІ з документуванням отриманих результатів J_{IC-D} ;
- промірні роботи з генеруванням цифрової 3D-карти дна та просторового розташування підводної частини об'єктів МКІ та виявлених несанкціоновано розміщених предметів J_{IC-M} ;
- інспекція об'єктів МКІ з застосуванням вимірювальних приладів J_{IC-I} ;
- супровід та документування процесів поточного технічного обслуговування підводної частини об'єктів МКІ із застосуванням підводного інструменту J_{IC-T} ;
- супровід будівництва підводної частини об'єктів МКІ J_{IC-B} , пов'язане з його модернізацією;
- виконання операцій з доставки та застосуванню за призначенням спеціального обладнання для протидії підводним зловмисникам об'єктів МКІ J_{IC-R} ;

Множину J_{IC} наведених груп основних робіт з моніторингу технічного стану підводної частини інженерного комплексу IC запишемо у вигляді відношення:

$$J_{IC} = \{J_{IC-D}; J_{IC-M}; J_{IC-I}; J_{IC-T}; J_{IC-R}; J_{IC-B}\}. \quad (3.2)$$

Зазначимо, що роботи, наведені в (3.2), є типовими практично для всіх об'єктів комплексу інженерних споруд IC . Виключенням є судна технічного флоту STF , проте обстеження і документування технічного стану їх підводної частини також може виконуватись за допомогою окремих типів засобів морської робототехніки

Зауважимо також, що кожна з наведених робіт множини (3.2) являє собою складний виробничий процес, який реалізується у кліматично складних морських умовах експлуатації. Автоматизацію таких робіт доцільно виконувати на основі широкого застосування засобів морської робототехніки у наступних основних режимах C :

- дистанційного керування оператором C_O ;

- автоматизованого керування C_{AO} , коли одна частина робочих операцій морського робота виконується автоматично, а друга частина робочих операцій традиційно виконується оператором;

- автоматичного керування C_A , коли оператор не приймає участі у виконанні засобом морської робототехніки робочих операцій.

Множина режимів керування засобами морської робототехніки буде мати вид:

$$C = \{C_O; C_{AO}; C_A\}. \quad (3.3)$$

Розглянемо тепер множину засобів морської робототехніки MR , які доцільно використовувати для охорони об'єктів МКІ на мілководних акваторіях.

Аналіз науково-технічної та виробничої літератури [49-52], а також практичний досвід науково-дослідного інституту підводної техніки НУК у розробці та впровадженні засобів морської робототехніки свідчить [53], що для охорони об'єктів МКІ у територіальних водах України доцільно залучати наступні види цієї техніки:

- безпілотні літальні апарати (БПЛА) – для оперативного візуально-оптичного обстеження морських акваторій у реальному часі з метою виявлення ознак технологічних аварій (виявлення місць аварійного витоку газу чи конденсату на морську поверхню);

- самохідні прив'язні підводні апарати (СППА) – для виконання інспекційних, картографічних та інструментальних підводних робіт у реальному часі при їх застосуванні з MSP , BC чи з борту суден технічного флоту STF ;

- буксируваних ненаселених підводних апаратів (БПА), які буксируються суднами технічного флоту – для високопродуктивного обстеження у реальному часі підводних трубопроводів, пошукових робіт на великих за площею акваторій;

- автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) – для обстеження морських підводних трубопроводів та пошукових робіт на великих площах морського дна;

- безекіпажних надводних суден (БНС) – носіїв СППА, БПА,БПЛА та АНПА, що реалізують безлюдні технології охорони об'єктів МКІ, інспекції технічного стану та супровід ремонтних робіт складових інженерного комплексу з видобування енергоносіїв ІС.

Тоді множина засобів морської робототехніки MR буде мати вид:

$$MR = \{MR_{БПЛА}; MR_{СППА}; MR_{БПА}; MR_{АНПА}; MR_{БНС}\}. \quad (3.4)$$

Застосування будь-якого типу морського робота до виконання робіт згідно множині (3.2) необхідно оцінювати за допомогою системи критеріїв ефективності EC . У більшості випадків це дасть змогу кількісно оцінити рівень роботизації інженерного комплексу з видобування енергоносіїв ІС.

До основних критеріїв ефективності доцільно віднести:

- продуктивність виконання робіт множини (3.2) EC_P ;
- якість виконання робіт множини (3.2) EC_Q ;
- економічна ефективність застосування конкретного засобу морської робототехніки з множини (3.4) EC_E .

Практичний досвід науково-дослідного інституту підводної техніки НУК у впровадженні засобів морської робототехніки у морську практику свідчить, що на кількісні показники критеріїв (3.4) суттєво впливає рівень її автоматизації, який визначається режимами керування (3.3).

У підсумку, множина критеріїв ефективності EC може бути представлена наступними основними критеріями:

$$EC = \{EC_P; EC_Q; EC_E\}. \quad (3.5)$$

Вказані критерії у подальшому можуть доповнюватись, виходячи з реального стану морської видобувної галузі та рівня розвитку техніки.

Таким чином, множини (3.1), (3.2) і (3.5) утворюють інформаційну основу для оцінки доцільності залучення конкретних типів морських роботів (3.4) у

роботах з охорони та планової експлуатації об'єктів МК, що розташовані у територіальних водах України.

На практиці це може бути реалізовано у вигляді тривимірної матриці «Об'єкт МКІ IC – Охоронна робота об'єкті МКІ J_{IC} – Ефективність охорони об'єкта МКІ EC » розміром $[7 \times 6 \times 3]$), яка показує можливість та доцільність застосування конкретного типу ЗМР для експлуатації та охорони інженерних споруд українського шельфу Азовського і Чорного морів.

Структура тривимірної матриці наведена на рис. 3.1.

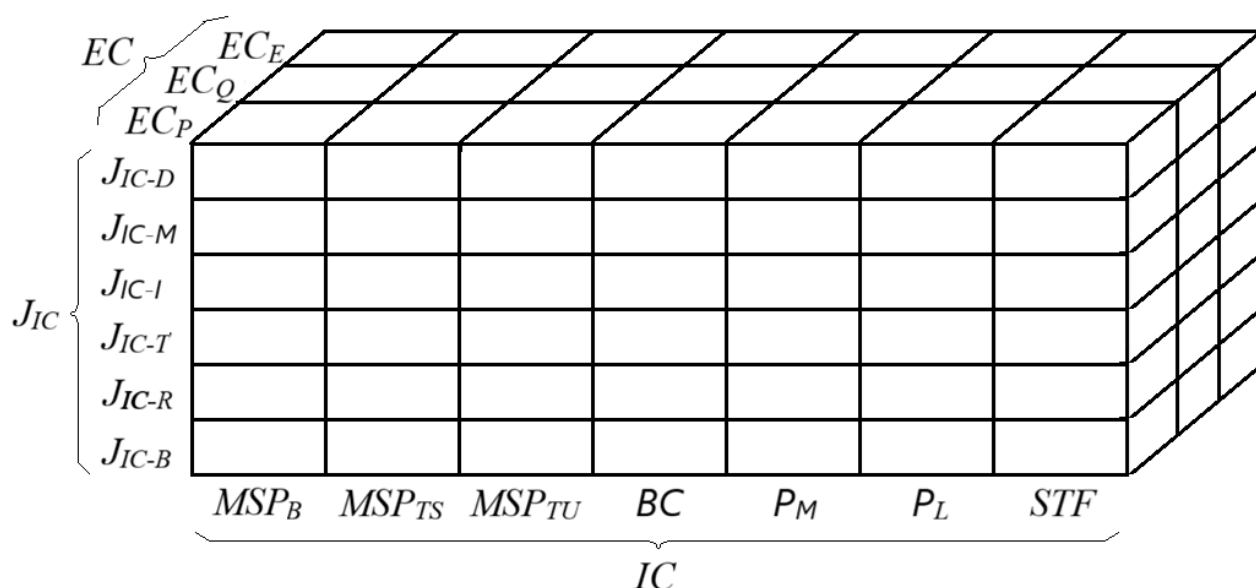


Рисунок 3.1 – Структура тривимірної матриці $M_{IC-J-EC}$ як інформаційна основа робіт із концептуального проєктування засобів морської робототехніки

Кожний елемент матриці $M_{IC-J-EC}$ характеризує доцільність залучення засобів морської робототехніки (ЗМР) до виконання типових робіт з охорони та експлуатації конкретного об'єкту МКІ та ефективність виконання цих робіт даним видом ЗМР.

Розглянемо тепер можливі архітектурно-конструктивні типи засобів надводної та підводної робототехніки та їх приладове оснащення, яке необхідне для успішного застосування такої техніки за призначенням.

До традиційних архітектурно-конструктивних типів такої техніки, яка здебільшого використовується для охорони об'єктів МКІ, належать:

- безпілотні літальні апарати (БПЛА) коптерного типу, оскільки це визначається умовами запуску та повернення після польоту; такі БПЛА оснащені здебільшого пошуковою фото- і відеоапаратурою, а також спеціальними приладами для пошуку магнітних аномалій та виявлення місць витоку вуглеводнів на поверхню моря;

- самохідні прив'язні підводні апарати (СППА) класу «міні» з масою до 100 кг, які мають 3-6 рушійних пристроїв, оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами, а також приладами для метрологічної інспекції підводних конструкцій, відбірниками проб води і ґрунту та маніпуляторами для виконання обмеженого переліку інструментальних та технічних робіт під водою;

- буксировані ненаселені підводні апарати (БПА) типу «планер», оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами для виконання пошукових і картографічних підводних робіт з високою продуктивністю та якістю;

- автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) малого класу з масою до 100 кг, оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами;

- малорозмірні безекіпажні надводні судна (БНС), оснащені відповідними системами автоматичного керування і зв'язку та навігаційним обладнанням, яке забезпечує безаварійну їх експлуатацію; такі судна оснащені фото-, відео- та радіолокаційною апаратурою для охорони об'єктів МКІ від загроз, які утворюються на поверхні моря, а також пошуковою гідроакустичною апаратурою для моніторингу підводної обстановки; такі судна також можуть бути носіями АНПА, СППА, БПА та БПЛА і забезпечують їх ефективне застосування за призначенням.

На рис. 3.2 наведено типи засобів морської робототехніки, яка традиційно використовується при експлуатації та охорони інженерних споруд провідними морськими країнами світу та, частково, на українському шельфі Азовського і Чорного морів до 2014 року.



Рисунок 3.2 – Засоби морської робототехніки, яка використовується провідними морськими країнами світу для експлуатації та охорони об'єктів МКІ

Попередні дослідження показують, що на цей час доцільно доповнити наведений вище перелік засобів морської робототехніки ще одним архітектурно-конструктивним типом морського робота, який найбільш ефективно може виконувати великий перелік підводних робіт на мілководних акваторіях. Саме такі акваторії є характерними для українського шельфу Азовського і Чорного морів.

Концепція АНПА з буксируванням радіобуєм викладена у п.р. 1.3 дисертації, а склад обладнання показано на рис. 1.7. Перевагами ЗМР такого типу є можливість оперативного інформаційного обміну між АНПА, що виконує охоронну місію, та людиною-оператором, який знаходиться на БЦК, у реальному часі.

Тобто, такі підводні апарати-роботи поєднують переваги «класичних» АНПА (незалежність їх роботи від дистанції до судна-носія) з перевагами «класичних» СППА (можливість керування підводним роботом та отримання від нього інформації про підводну обстановку у реальному часі)..

3.3 Аналіз загроз безпеці об'єктам МКІ на основі системного підходу та узагальнена структура автоматизованої системи управління безпекою на основі використання АНПА-РБ

Як показано вище, до об'єктів МКІ відносяться об'єкти, які є стратегічно важливими для економіки і національної безпеки будь-якої морської держави. Порушення їх функціонування може призвести до екологічних катастроф та завдати шкоди життєво важливим національним інтересам цих держав.

Очевидно, що водні транспортні систем морських держав (у першу чергу, морський транспорт, морські шляхи та порти), видобувні споруди морського шельфу (морські стаціонарні нафтогазові платформи, підводні трубопроводи) та морські системи кабельного зв'язку (підводні кабелі) відносяться до об'єктів морської критичної інфраструктури і повинні мати сучасну систему безпеки.

З метою формулювання задач зовнішнього проєктування АНПА-РБ як нового типу ЗМР виконаємо аналіз загроз об'єктам МКІ з залученням методології системного підходу [5, 22] та сформуємо науково-організаційні засади створення системи роботизованого моніторингу безпеки (охорони) таких об'єктів на основі застосування АНПА-РБ.

Як показано у Розділі 1 (п. 1.1.1), основні загрози безпеці об'єктів МКІ $T_{\text{МСІ}}$ доцільно поділяти на зовнішні $T_{\text{МСІ-Е}}$ і внутрішні $T_{\text{МСІ-І}}$.

Основними чинниками для виникнення зовнішніх загроз $T_{\text{МСІ-Е}}$, зазвичай, є:

- наявність військових агресивних дій у територіальних водах морської держави;
- активізація діяльності транснаціональної організованої злочинності та терористичних організацій;
- загострення міжнародної конкуренції щодо володіння новими морськими транспортними та енергетичними ринками;
- можливе технологічне відставання технологій охорони об'єктів МКІ від технологій впливу зловмисників на ці об'єкти;
- природні або техногенні катастрофи на акваторіях, де розташовані об'єкти МКІ – шторми, цунамі, дію полів криги тощо.

Основними чинниками для виникнення внутрішніх загроз $T_{\text{МСІ-І}}$ у сфері морської безпеки є протиправні дії зловмисників, націлені на:

- організацію та проведення терористичних акцій (угон або захоплення морських та річкових суден піратами з метою грабежу чи отримання викупу);
- організацію та проведення диверсійних акцій проти об'єктів МКІ (пошкодження або знищення суден, кораблів чи гідротехнічних споруд);
- кримінальні дії проти пасажирів з метою шантажу чи отримання викупу;

- несанкціоноване втручання у функціонування засобів зв'язку водного транспорту, що загрожує життю і здоров'ю пасажирів, несе прямий збиток водному транспортному комплексу.

Очевидно, що робототехнічний захист об'єктів МКІ можливий, в основному, від внутрішніх загроз $T_{\text{МCI-I}}$. Враховуючи особливості морського розташування об'єктів охорони розглянемо головні напрямки дій зловмисників, які націлені на створення загроз безпечному функціонуванню таких об'єктів.

З широкого спектру внутрішніх загроз об'єктам МКІ виділимо такі основні технічні засоби як інструмент реалізації таких загроз [53]:

- підводно-технічні транспортні засоби як носії зловмисників у легководолазному спорядженні (буксирувальники легководолазів тощо);
- розвідувальні та ударні АНПА;
- несанкціоновано розміщені на морському дні стаціонарні об'єкти (розвідувальна апаратура, вибухонебезпечні предмети тощо).

Виходячи з принципів системного підходу [22] та особливостей його застосування [5] доцільно весь спектр $T_{\text{МCI-I}}$ внутрішніх загроз об'єктам МКІ представити наступними напрямками:

- загрози фізичного доступу зловмисників до об'єктів МКІ $T_{\text{МCI-I-P}}$ – несанкціоноване проникнення на захищену акваторію чи об'єкт, який знаходиться на захищеній акваторії, з диверсійною чи терористичною метою;

- загрози енергетичній складовій функціонування об'єктів МКІ $T_{\text{МCI-I-E}}$ – ураження енергетичного обладнання об'єкту МКІ з метою порушення його функціонування;

- загроза інформаційній складовій функціонування об'єктів МКІ $T_{\text{МCI-I-I}}$ – несанкціоноване втручання у функціонування засобів зв'язку (наприклад, кібератаки), що загрожує життю та здоров'ю персоналу, завдає прямої шкоди, породжує в суспільстві негативні соціально-політичні, економічні, психологічні наслідки;

- загроза персоналу, який працює на об'єктах МКІ $T_{\text{МCI-I-H}}$ – кримінальні дії з метою шантажу чи отримання викупу, завдання шкоди здоров'ю та життю людей.

Тоді множину T_{MCI-I} внутрішніх загроз об'єктам МКІ укрупнено можна представити наступною множиною:

$$T_{MCI-I} = \{T_{MCI-I-P}; T_{MCI-I-E}; T_{MCI-I-I}; T_{MCI-I-H}\}. \quad (3.6)$$

Узагальнену структуру системи автоматизованої охорони та моніторингу безпеки об'єктів МКІ пропонується будувати у вигляді роботизованої системи охорони об'єктів МКІ (PCO), яка ґрунтується за застосуванні АНПА-РБ, які оснащені відповідними сенсорами та інструментальними засобами.

Така система складається з наступних трьох підсистем [54]:

- роботизованої підсистеми SS_{MR-DW} виявлення та попередження про загрози безпеці об'єктам МКІ, завданням якої є приладове виявлення загроз та їх ідентифікація шляхом порівняння з даними, що знаходяться у базі даних;
- автоматизованої підсистеми SS_{MR-MO} вибору методів протидії виявленим загрозам безпеки, яка в ручному або автоматизованому режимі виконує оцінку виявлених загроз та приймає рішення про методи протидії загрозам;
- роботизованої підсистеми SS_{MR-UN} управління процесом реалізації обраних методів нейтралізації виявлених загроз.

Роботизована підсистема SS_{MR-DW} виявлення та попередження про загрози безпеці об'єктам МКІ включає в себе:

- інформаційну мережу, що об'єднує джерела інформації про повітряну, надводну та підводну обстановку об'єкту МКІ; основну функцію щодо інформації про підводну обстановку виконують АНПА-РБ, оснащені відповідними сенсорними системами – гідроакустичною $SS_{MR-DW-G}$, магнітометричною $SS_{MR-DW-M}$, оптичною $SS_{MR-DW-O}$, системою для оперативного вимірювання параметрів водного середовища $SS_{MR-DW-M}$ тощо;
- пост обробки інформації (береговий центр керування охоронною місією), яка надходить від АНПА-РБ, у якому виконується первинна обробка даних, їх нормалізація та ідентифікація загроз об'єктам МКІ;
- база даних про можливі загрози фізичній безпеці об'єктів МКІ.

Результатом роботи поста обробки інформації (зазвичай, це БЦК) є таблиці виявлених цілей і класифікація створюваних ними загроз.

Роботизована підсистема SS_{MS-MO} призначена для автоматизованої (з можливістю ручного контролю оператором) оцінки загроз, виявлених підсистемою SS_{MR-DW} , та прийняття рекомендаційних рішень щодо методу адекватної протидії цим загрозам на основі застосування АНПА-РБ.

У результаті роботи підсистеми SS_{MR-MO} формуються рекомендації щодо технологій застосування АНПА-РБ, якими доцільно і можливо нейтралізувати виявлені загрози.

Роботизована підсистема SS_{MR-UN} управління процесом реалізації обраних методів нейтралізації виявлених загроз призначена для:

- ручного або автоматизованого керування процесом застосування спеціального обладнання АНПА-РБ для нейтралізації виявлених загроз;
- документування процесів та результатів роботи РСО об'єктів МКІ.

Укрупнено підсистема SS_{MR-UN} має чотири основні рівні нейтралізації виявлених підводних загроз, для реалізації яких на етапах зовнішнього і внутрішнього проєктування АНПА-РБ мають бути визначені його інструментальні засоби:

- рівень $SS_{MR-UN-P}$ фізичного захисту від несанкціонованого проникнення (бонові загородження, підводні троси і сітки тощо); завдання АНПА-РБ полягає у контролі працездатності технічних засобів цього рівня;

- рівень $SS_{MR-UN-V}$ попередження порушників про їх виявлення системою охорони; завдання АНПА-РБ полягає у доставці у зону перебування порушників спеціального обладнання, яке інформаційно впливає на них, ініціалізація цього обладнання та контроль за діями порушників;

- рівень $SS_{MR-UN-F}$ силової протидії порушникам; завдання АНПА-РБ полягає у доставці у зону перебування порушників спеціального обладнання, ініціалізація якого викликає больові синдроми у порушників, ініціалізація цього обладнання та контроль за діями порушників;

- рівень $SS_{MR-UN-L}$ летального впливу на порушників у випадку, коли вони не відмовились від атаки на об'єкт МКІ; завдання АНПА-РБ полягає у доставці у зону перебування порушників спеціального обладнання, ініціалізація якого викликає летальний результат, ініціалізація цього обладнання та контроль за результатами роботи цього обладнання.

Для досягнення високої ефективності роботи РСО повинна мати канали зв'язку з іншими РСО сусідніх об'єктів МКІ, що розташовані на даній акваторії та канал зв'язку з системою керування верхнього рівня.

Тоді систему S_{PCO} роботизованої охорони об'єктів МКІ укрупнено можна представити наступною множиною:

$$S_{PCO} = \{SS_{MR-DW}; SS_{MR-MO}; SS_{MR-UN}\}. \quad (3.7)$$

Очевидно, що безпосередня роль АНПА-РБ у функціонуванні РСО об'єктів МКІ полягає у функціонуванні підсистем SS_{MR-DW} та SS_{MR-UN} .

Попередній, на етапі зовнішнього проєктування, аналіз вимог до технічних характеристик АНПА-РБ як носія інструментальних засобів для приладового дистанційного виявлення загроз функціонуванню об'єктів МКІ SS_{MR-DW} та захисту від них SS_{MR-UN} свідчить про доцільність і можливість їх ефективного застосування у РСО. Місце АНПА-РБ в організаційній структурі для розв'язку завдань охорони об'єктів МКІ показано на рис. 3.3.

Відношення (3-1)-(3-7) з урахуванням організаційної структури, наведеної на рис. 3.3) утворюють науково-організаційне підґрунтя для побудови високоефективних систем роботизованої охорони об'єктів МКІ, які розташовані на мілководних акваторіях.

Розглянемо тепер, власне, основні етапи зовнішнього і внутрішнього проєктування АНПА-РБ як нового засобу підводної робототехніки, який згідно рис.3.3 є основним з реалізації охоронних технологій об'єктів МКІ.

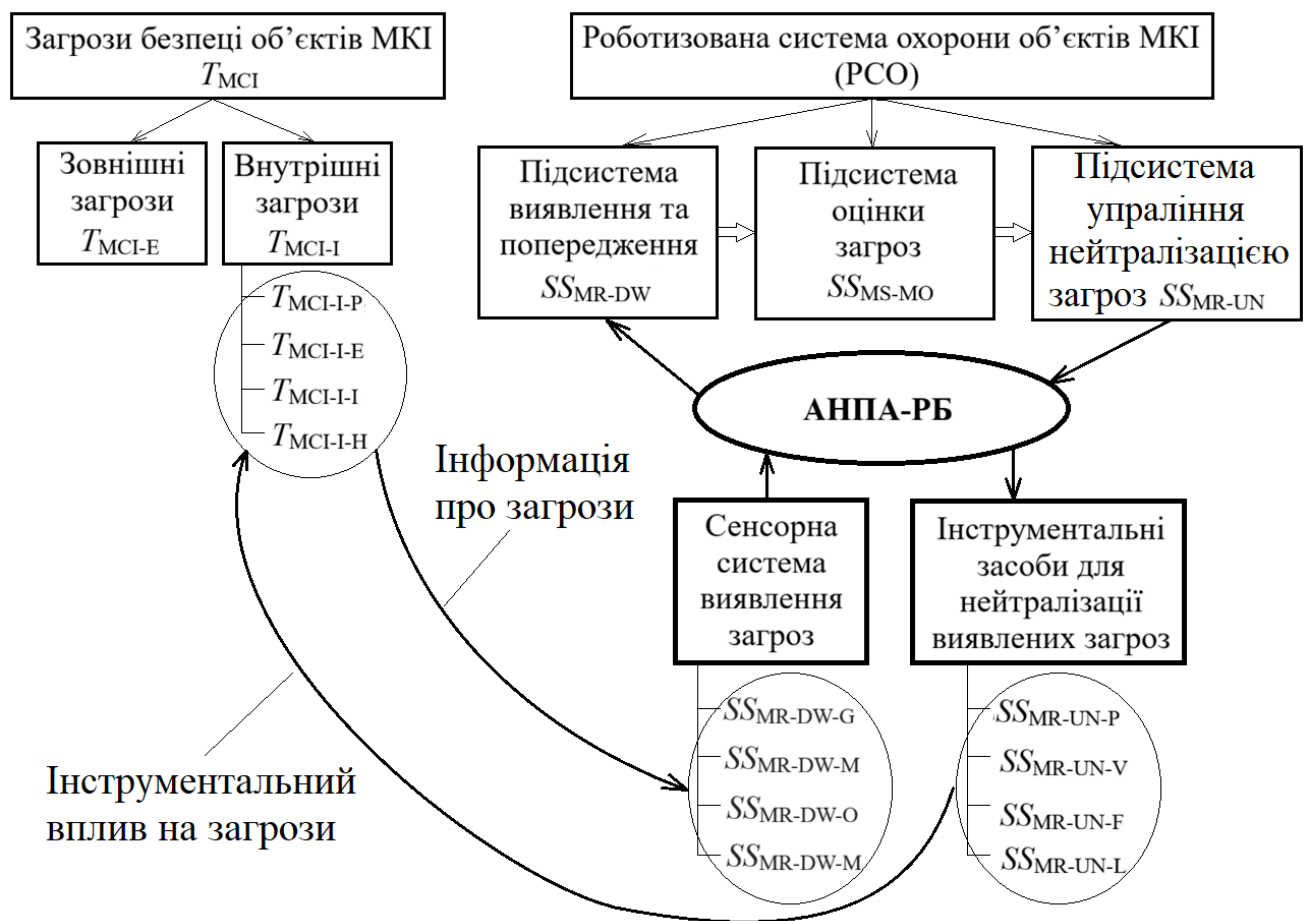


Рисунок 3.3 – Організаційна структура функціонування роботизованої системи охорони об'єктів МКІ

3.4 Завдання зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируваним радіобуєм

3.4.1. Загальні зауваження. Очевидно, що для охорони об'єктів МКІ на цей час найбільш широко використовуються самохідні прив'язні підводні апарати-роботи (СППА, в англійській літературі – Remotely Operated Vehicles, ROV) та автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, в англійській літературі – autonomous underwater vehicles, AUV). Кожний з цих ЗПР має свої переваги і недоліки.

Так, до важливих експлуатаційних характеристик СППА відноситься можливість оперативного відео- та телеметричного зв'язку з береговим центром керування (БЦК) морською охоронною місією, недоліком – наявність кабель-тросу

керування, що обмежує робочий радіус апарата. Крім того, для роботи на великих за площею акваторіях такі апарати можуть працювати лише з борту судна забезпечення, що суттєво знижує продуктивність морських охоронних місій та робить їх залежними від погодних умов на акваторії.

До суттєвих переваг АНПА відноситься їх великий робочий радіус та незалежність від погодних умов та судна забезпечення. Однак, суттєвим недоліком АНПА є відсутність оперативного зв'язку з БЦК на весь час виконання підводної охоронної місії.

Ефективним технічним рішенням для морських охоронних місій на мілководних об'єктах МКІ є розробка і застосування АНПА, оснащених буксируемими радіобуями (РБ), які поєднують переваги СППА та АНПА [55]. Прикладом такого технічного рішення є підводний комплекс спільного виробництва італійської компанії «Pluto» та швейцарської компанії «idRobotica» [56], рис. 3.4. Комплекс складається з підводного апарата-робота «Pluto Plus» з лебідкою кабель-буксира (ЛКБ) та буксированого радіобуя (РБ) «Radio buoy».

На рис. 3.4 зображено: а – комплекс перед зануренням (РБ «Radio buoy» закріплений «по-похідному» у кормовій частині підводного апарата «Pluto Plus»); б – загальний вид РБ; в – робоче положення РБ «Radio buoy» під час буксирування підводним апаратом «Pluto Plus».

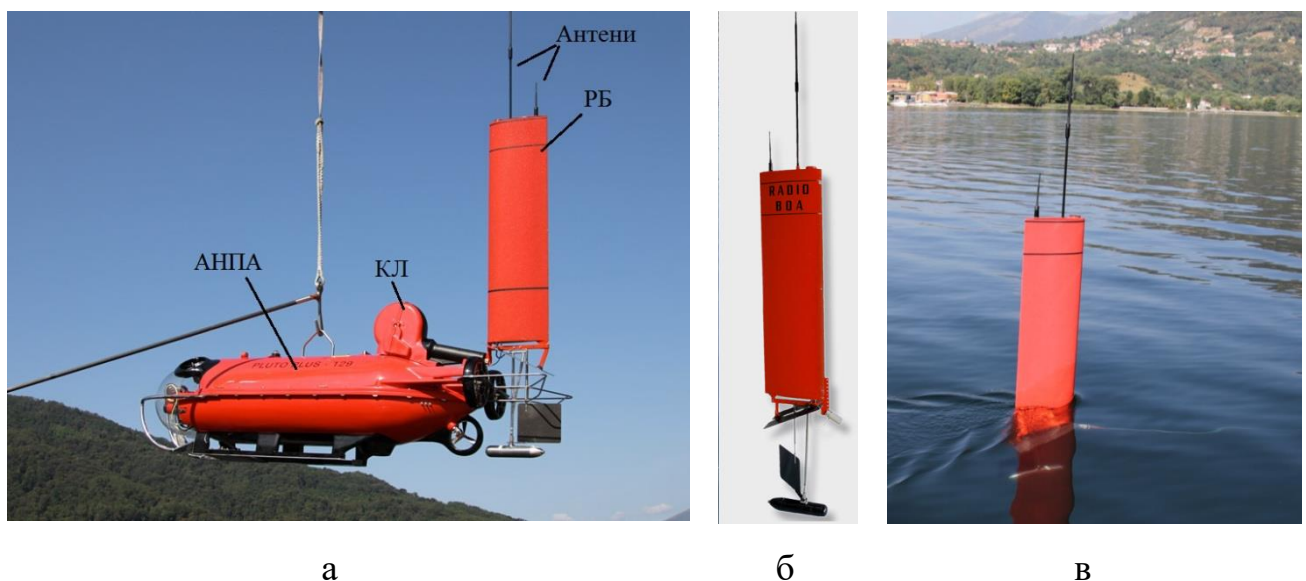


Рис. 3.4 – Підводний комплекс у складі АНПА «Pluto Plus» та РБ «Radio buoy»

Підводний апарат «Pluto Plus» у базовій комплектації являє СППА з акумуляторним джерелом живлення. Апарат призначений для виконання широкого спектру підводних робіт – від підводної археології до пошуку та знешкодження морських мін.

Наявність буксируваного радіобуя надає апарату переваги АНПА (відсутність механічного зв'язку з судном забезпечення) та переваги СППА (можливість оперативної передачі підводної інформації та оперативного керування апаратом у реальному часі).

Зазначений автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм поєднує переваги СППА (наявність постійного інформаційного обміну між підводним апаратом і БЦК) з перевагами традиційних АНПА (незалежність від погодних умов та від судна забезпечення). Найбільш ефективно використання таких АНПА-РБ – наукові дослідження та пошукові роботи на невеликих за площею мілководних акваторіях.

Однак, постійне буксирування РБ призводить до неприпустимо великого споживання енергії. Це особливо важливо, коли морська місія передбачає послідовне обстеження декількох віддалених одна від одної акваторій, або автоматичне виконання підводних пошукових операцій, коли зв'язок з БЦК необхідно встановлювати тільки при виявленні підводного потенційно небезпечного предмета (ППНП). В обох цих випадках бажано, щоб РБ знаходився всередині АНПА і випускався лише за необхідності утворювати онлайн-зв'язок з БЦК.

3.4.2. Удосконалення АНПА-РБ. Для реалізації охоронних морських місій пропонується удосконалений АНПА-РБ, який має можливість автоматично випускати РБ та повертати його до складу АНПА (рис. 3.5) [57, 58].

Пропонований АНПА має торпедоподібну форму корпусу, рушійний пристрій (РП) та хвостове оперення (ХО) у складі рулів напрямку та рулів глибини. У носовій частині АНПА розташовано змінне навісне обладнання (ЗНО) для виконання підводних робіт. У кормовій частині АНПА міститься лебідка кабель-буксира (ЛКБ) та ложемент (Л) з розміщенням у ньому РБ.

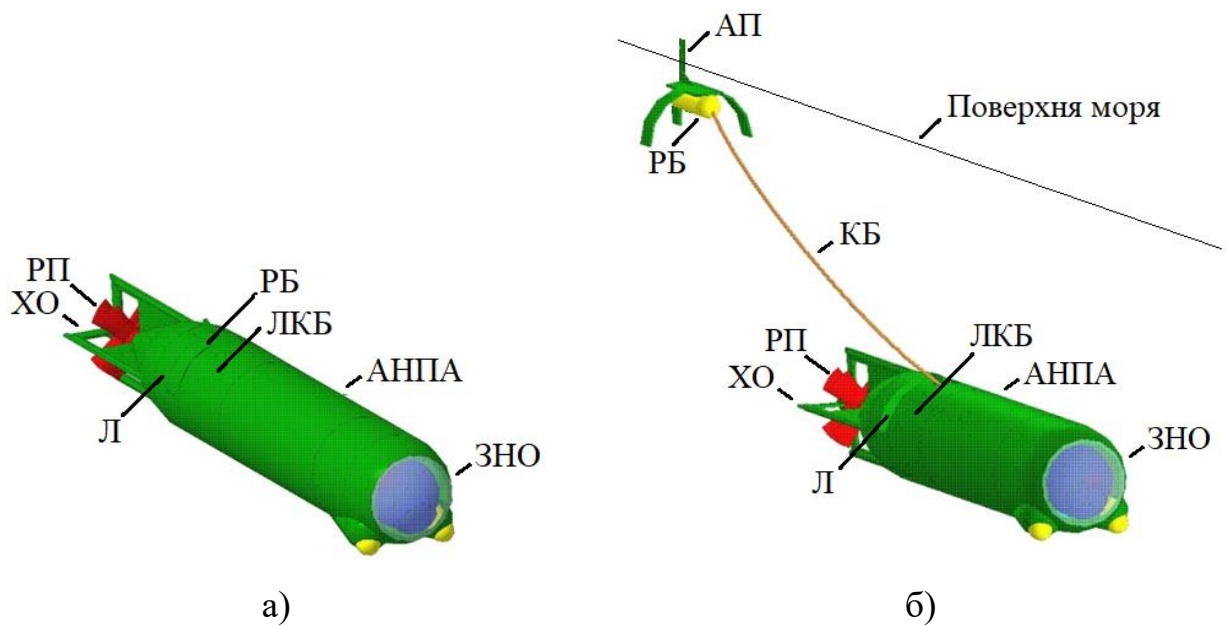


Рисунок 3.5 – Удосконалений АНПА-РБ: а – РБ в ложементі всередині АНПА;
б – РБ у робочому стані

Особливістю конструкції РБ є дугова форма його несучих поверхонь (крил). Кривизна дуги крил РБ відповідає кривизні форми зовнішнього корпусу АНПА, тому у вихідному (початковому) положення РБ не порушує циліндричну форму зовнішнього корпусу апарата і, як наслідок, АНПА не має додаткових сил опору його руху. Це забезпечує суттєву економію витрат електроенергії бортового джерела енергії і збільшує продуктивність ЗПР.

У початковому стані РБ знаходиться всередині АНПА і закріплений на спеціальному ложементі (рис. 3.5, а). При необхідності організації комунікації з БЦК висувний механізм ложемента висуває РБ назовні у потік води, що набігає. Лебідка кабель-троса попускає КБ і радіобуй під дією підйомної сили, яка виникає на дугових крилах РБ у результаті його буксирування, займає положення під поверхнею води (рис. 3.5, б).

Одночасно з цим виконується підйом антенних пристроїв (АП) радіобуя у робоче положення. Величина заглиблення РБ регулюється системою автоматичного керування так, щоб забезпечити надводне положення його АП, необхідне для комунікації з БЦК.

Однак, для впровадження такого виду ЗПР у морську практику необхідно розв'язати низку прикладних наукових задач.

3.4.3. Проектні завдання АНПА-РБ. Попередній аналіз показує, що до першочергових прикладних наукових завдань (в англomовній літературі – Applied Scientific Task, *AST*), успішний розв'язок яких дасть змогу розробляти і впроваджувати у морську практику вказаний новий вид ЗПР, варто віднести наступні дві групи завдань зовнішнього і внутрішнього проектування АНПА-РБ:

завдання зовнішнього проектування DE :

- визначення експлуатаційних переваг АНПА-РБ у порівнянні з традиційними АНПА DE_{OA} ;

- обґрунтування типорозмірного ряду та визначення необхідної кількості АНПА-РБ забезпечення успішної охорони та захисту об'єктів МКІ DE_{DN} ;

завдання внутрішнього проектування DI :

- розробка принципів функціонування механізму розгортання (випускання) та згортання (повернення до АНПА) DI_{DPO} ;

- дослідження гідродинаміки РБ як невід'ємної теоретичної складової його інженерного проектування DI_{DH} .

- розробку узагальненого алгоритму роботи системи автоматичного керування виконавчими механізмами обладнання розгортання та згортання РБ, яка має забезпечити узгоджене функціонування ложементом і лебідкою кабель-буксира DI_{DCS} . **Примітка:** вказане завдання відноситься до іншої наукової спеціальності і тут не розглядається.

Отримані прикладні наукові завдання, розв'язок яких забезпечить створення пропонованого ЗПР, можна представити наступними множинами задач:

$$AST = \{DE; DI\}; \quad (3.8)$$

$$DE = \{DE_{OA}; DE_{DN}\}; \quad (3.9)$$

$$DI = \{DI_{DPO}; DI_{DH}; DI_{DCS}\}. \quad (3.10)$$

Очевидно, що розв'язок прикладних наукових завдань *AST* доцільно виконувати послідовно, починаючи з завдань зовнішнього проєктування *DE* і закінчуючи завданнями внутрішнього проєктування *DI*.

Сформулюємо завдання зовнішнього проєктування АНПА з буксируванням РБ як необхідну науково-методологічну основу створення такого засобу морської робототехніки для охорони та захисту мілководних об'єктів МКІ.

3.4.4. Сутність зовнішнього проєктування АНПА-РБ. Зовнішнє проєктування АНПА-РБ передбачає формування загального технічного вигляду, архітектурно-конструктивної компоновки та головних технічних характеристик апарата як цілісного інженерного об'єкта [59]. На цьому етапі здійснюється системна ідентифікація майбутнього виробу як складної технічної системи, що функціонує в умовах змінного гідродинамічного впливу.

Сутність зовнішнього проєктування полягає у встановленні основних принципів побудови апарата, які забезпечують досягнення необхідних експлуатаційних показників, з урахуванням функціонального призначення та умов застосування. Для АНПА-РБ, що призначені для виконання технічних робіт із забезпечення охорони об'єктів МКІ, ці принципи повинні забезпечувати можливість виконання пошукових, картографічних, інспекційних та транспортних операцій у складних мілководних умовах, де застосування водолазів є небезпечним або економічно недоцільним, виходячи з міркувань продуктивності.

На етапі зовнішнього проєктування АНПА-РБ виконується визначення:

- цільового призначення апарата, які він має виконувати в складі комплексу засобів охорони МКІ (задача DE_{OA-J});
- умов експлуатації, включаючи глибини, течії, прозорість води, наявність донних відкладень та штучних перешкод (задача DE_{OA-T});
- основних геометричних характеристик корпусу – архітектурно-конструктивний тип апарата і його РБ, масо-габаритні характеристики тощо (задача DE_{OA-H});
- гідродинамічної схеми, що визначає рухливість, маневреність і стійкість апарата (задача DE_{OA-M});

- попередньої схеми розміщення функціональних модулів – енергетичного, навігаційного, комунікаційного, пошукового, сенсорного та маніпуляційного (задача DE_{OA-C});

- попереднього енергетичного балансу, що дозволяє оцінити тривалість автономної роботи АНПА-РБ (задача DE_{OA-E});

- попередніх показників інформаційно-комунікаційних можливостей АНПА-РБ (задача DE_{OA-I});

- інтеграційних вимог до взаємодії з надводними або береговими пунктами управління (задача DE_{OA-TW}), оскільки АНПА-РБ має бути елементом комплексної морської робототехнічної системи спостереження, контролю та охорони об'єктів МКІ, що забезпечує реалізацію концепції ситуаційної поінформованості та безперервного контролю простору у зоні охорони.

Тоді завдання DE_{OA} зовнішнього проєктування АНПА-РБ можна представити у вигляді наступної множини задач [60]:

$$DE_{OA}=\{DE_{OA-J}; DE_{OA-T}; DE_{OA-H}; DE_{OA-M}; DE_{OA-C}; DE_{OA-E}; DE_{OA-I}; DE_{OA-TW}\}. \quad (3.11)$$

Таким чином, зовнішнє проєктування визначає концептуальну модель АНПА-РБ – його архітектуру, функціональні можливості, конструктивні межі й потенціал автоматизації та інтеграції до складу систем захисту об'єктів МКІ більш високих рівнів. Цей етап поєднує елементи системного аналізу, гідромеханіки, теорії та проєктування суден, ергономіки (у випадку дистанційного управління) та теорії автоматичного керування.

Розглянемо тепер особливості розв'язку задач множини (3.11) зовнішнього проєктування АНПА-РБ.

Зовнішнє проєктування АНПА-РБ, який виконує технічні роботи в інтересах охорони МКІ на мілководних морських акваторіях, доцільно представити деякою множиною взаємопов'язаних задач, що ґрунтуються на застосуванні методології системного підходу [4, 5].

Згідно з цим множину задач (3.11) представимо чотирма основними підмножинами (індекс « OA » опускаємо для спрощення аналітичних записів):

$$DE_M = \{DE_{OA-H}; DE_{OA-M}; DE_{OA-C}\}; \quad (3.12)$$

$$DE_E = \{DE_{OA-E}\}; \quad (3.13)$$

$$DE_I = \{DE_{OA-I}\}; \quad (3.14)$$

$$DE_{K\Phi} = \{DE_{OA-J}; DE_{OA-T}; DE_{OA-TW}\}, \quad (3.15)$$

де: DE_M – підмножина конструктивно-компоновочних та гідродинамічних задач (критерій системного підходу «Матерія»);

DE_E – підмножина задач енергетики підводного апарата (критерій системного підходу «Енергія»);

DE_I – підмножина інформаційно-комунікаційних та керуючих задач (критерій системного підходу «Інформація»);

$DE_{K\Phi}$ – підмножина задач ефективного застосування АНПА-РБ за призначенням (критерій системного підходу «Корисна функція»).

Розглянемо послідовно особливості розв'язку вказаних задач.

Підмножина задач DE_M розв'язується відомими методами конструювання ЗПР [6, 61], проте, з урахуванням наступних особливостей:

- для задачі DE_{OA-H} визначення основних геометричних характеристик корпусу – має бути враховано, що АНПА-РБ має два основних режими експлуатації (рух АНПА як твердого тіла в рідині та рух АНПА-РБ в рідині як системи двох твердих тіл та гнучкого тіла (КБ), які мають силову взаємодію у потоці води);

- для задачі DE_{OA-M} визначення гідродинамічної схеми, що визначає рухливість, маневреність і стійкість апарата – має бути враховано, що експлуатація АНПА-РБ буде виконуватись у вказаних вище двох основних режимах, що вимагає застосування просторової моделі руху системи у складі двох твердих та одного гнучкого тіла у потоці води; при цьому слід також враховувати, що такий рух буде виконуватись в умовах зміни довжини попущеної частини КБ з-за зміни глибини

морської акваторії та при зміні центру мас РБ з-за підйому/опускання його антенних пристроїв;

- для задачі DE_{OA-C} визначення попередньої схеми розміщення функціональних модулів АНПА та РБ – має бути враховано, що прийняті конструктивно-технічні рішення мають забезпечувати зручність технічного обслуговування, транспортування та зберігання АНПА-РБ.

Розв’язок задачі DE_{OA-E} підмножини DE_E має на меті оцінити переваги АНПА-РБ на ринку ЗПР в плані його енергетичної автономності. Особливістю розв’язку цієї задачі є розробка методики оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу АНПА-РБ, яка матиме місце під час періодичного руху підводного апарата без радіозв’язку з БЦК. Зазначена методика має ґрунтуватись на теоретичній циклограмі окремих режимів роботи АНПА-РБ, які необхідні для виконання заданої морської охоронної місії.

Розв’язок задачі DE_{OA-I} підмножини DE_I має дати оцінку переваг інформаційно-комунікаційних характеристик АНПА-РБ на ринку ЗПР. Тут попередньо виконується оцінка систем навігації, автоматичного керування АНПА-РБ та його зв’язку з БЦК. Метою є оцінка попередніх проєктних рішень щодо забезпечення необхідної точності позиціонування, надійності зв’язку та ефективності системи автоматичного керування АНПА-РБ.

Задачі DE_{OA-J} ; DE_{OA-T} ; DE_{OA-TW} підмножини задач DE_{KF} ефективного застосування АНПА-РБ за призначенням на етапі зовнішнього проєктування розглянемо більш детально, оскільки саме їх розв’язки найбільш суттєво впливають на оцінку перспективності застосування нового виду ЗПР.

Попередній аналіз свідчить, що задача DE_{OA-J} визначення цільового призначення АНПА-РБ, може буди сформульована у вигляді наступних основних підзадач:

підзадачі DE_{OA-J-O} спостереження за підводною та надводною обстановкою з метою своєчасного виявлення потенційних загроз природного, техногенного або антропогенного походження;

підзадачі $DE_{OA-J-TCC}$ контролю технічного стану підводних і донних елементів МКІ, зокрема трубопроводів, кабелів зв'язку, портових споруд, енергетичних об'єктів;

підзадачі $DE_{OA-J-ACI}$ автоматизованого патрулювання та збору інформації в межах заданого морського району;

підзадачі $DE_{OA-J-DT}$ передачі телеметричних і навігаційних даних через буксирований радіобуй для забезпечення стійкого каналу зв'язку з БЦК;

підзадачі $DE_{OA-J-ISS}$ інтеграції з системами охорони МКІ, включаючи берегові центри моніторингу, безекіпажні надводні судна (БНС) і стаціонарні сенсорні вузли.

Додатковий аналіз підмножини задач $DE_{K\Phi}$ зовнішнього проектування ЗПР, що пропонується, вказує на доцільність уведення у розгляд ще однієї задачі, розв'язок якої буде сприяти більш повній оцінці ефективності АНПА-РБ – підзадачі DE_{OA-J-J} оцінки переліку основних робіт, які має виконувати АНПА-РБ.

Попередньо тут варто вказати на наступні роботи, які може виконувати АНПА-РБ, які у значній мірі збігаються з роботами по гуманітарному розмінуванню акваторій [62]:

- пошук, ідентифікація та картографування небезпечних або несанкціоновано розміщених об'єктів на акваторії, яка охороняється;

- нейтралізація небезпечних або несанкціоновано розміщених об'єктів на місці їх виявлення (маркування шляхом встановлення сигнального буя, знешкодження на місці чи укривання захисною конструкцією);

- підводне транспортування таких об'єктів до місця тривалого та безпечного підводного зберігання;

- документальне обстеження очищеної від небезпек акваторії для подальшої безпечної експлуатації об'єктів МКІ.

Особливу увагу під час зовнішнього проектування необхідно приділити перевагам АНПА-РБ у наступних двох варіантах реалізації охоронних місій:

- наявності неперервного зв'язку АНПА-РБ з БЦК при необхідності участі оператора підводного апарата у безпосередньому керуванні його роботою за переліком DE_{OA-J-J} ;

- можливості виконувати значну частину підводних місій апарата з мінімальними енерговитратами завдяки знаходженню його РБ в ложементі всередині АНПА.

Наступною складовою підмножини задач DE_{KF} є задача DE_{OA-T} визначення умов експлуатації АНПА-РБ. Виходячи з практичного досвіду колективу Науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, отриманого у напрямку застосування ЗПР при виконанні науково-дослідних, пошуково-обстежувальних та природоохоронних робіт, можна сформулювати наступні конкретні умови роботи такої техніки, які враховують як гідрокліматичні умови (підзадача $DE_{OA-T-HC}$), так і умови технічного обслуговування АНПА-РБ (підзадача $DE_{OA-T-MS}$).

Вказані умови зведемо у формі табл. 3.1.

Наведений вище приклад може слугувати основою для порівняльного аналізу ефективності АНПА охоронного призначення різних типів.

Нарешті, ще однією важливою складовою підмножини задач DE_{KF} є задача DE_{OA-TW} визначення інтеграційних вимог до взаємодії АНПА-РБ з БЦК.

Аналіз сучасного світового та вітчизняного досвіду створення й експлуатації надводних автономних морських платформ різного призначення свідчить, що задачу DE_{OA-TW} доцільно розв'язувати у складі чотирьох наступних підзадач:

- підзадача $DE_{OA-TW-CDE}$ забезпечення зв'язку та обміну даними з БЦК, яка включає забезпечення двостороннього зв'язку через буксирований РБ з дальністю до 10 км та можливість обміну інформацією у реальному часі;

- підзадача $DE_{OA-TW-ICP}$ інтеграції з береговими та мобільними (надводними та повітряними) пунктами управління, яка включає взаємодію з надводними ретрансляторами (БНС) для розширення зони зв'язку та підтримку стандартів NATO STANAG 4586 або їхніх національних аналогів;

Таблиця 3.1 – Приклад формулювання умов експлуатації АНПА-РБ

Параметр	Типові умови експлуатації
Гідрокліматичні умови (підзадача $DE_{OA-T-HC}$)	
Глибина акваторії	до 100 м
Тип донної поверхні	піщане, мулисте, глинисте; наявні донні відкладення різної щільності
Швидкість течії	до 1,5 м/с (корекція алгоритмами стабілізації)
Температура води	від $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$
Солоність	10–35‰
Прозорість води	0,5–15 м залежно від сезону та гідрології
Вітрове хвилювання (на поверхні)	до 3 балів за шкалою Бофорта
Наявність штучних перешкод	палі, підводні комунікації, залишки конструкцій, риболовні сітки, суднові якорні системи
Робоча тривалість місії	до 24 годин у автономному режимі
Умови технічного обслуговування (підзадача $DE_{OA-T-MS}$)	
Транспортування апарата	транспортний модуль
Вантажні операції	спуско-піднімальний пристрій
Керування і контроль	береговий та/або мобільний центр керування
Технічне обслуговування	модуль зберігання та технічного обслуговування

- підзадача $DE_{OA-TW-SC}$ сумісності сенсорних даних, яка включає взаємодію з надводними ретрансляторами (носії – надводні судна або літальні апарати) для збільшення дальності зв'язку, синхронізацію даних із навігаційних систем (INS, USBL, DVL), яка необхідна для узгодження в часі та координатах інформації від різних навігаційних сенсорів ЗПР з метою формування єдиної, узгодженої та достовірної оцінки його положення, швидкості та орієнтації у просторі;

- підзадача $DE_{OA-TW-ACR}$ оцінки ефективності системи автоматичного керування, яка включає оцінку можливості адаптивного коригування траєкторії за

умов течій та обмеженої підводної та надводної навігації, а також можливості дистанційної зміни алгоритмів місії з БЦК.

Тобто, на етапі зовнішнього проєктування АНПА-РБ основні складові підмножини задач $DE_{K\Phi}$ за критерієм системного підходу «Корисна функція» (8) можна представити наступними підзадачами:

$$DE_{OA-J} = \{DE_{OA-J-O}; DE_{OA-J-TCC}; DE_{OA-J-ACI}; DE_{OA-J-ACI}; DE_{OA-J-DT}; DE_{OA-J-ISS}; DE_{OA-J-J}\}; \quad (3.16)$$

$$DE_{OA-T} = \{DE_{OA-T-nc}; DE_{OA-T-mc}\}; \quad (3.17)$$

$$DE_{OA-TW} = \{DE_{OA-TW-CDE}; DE_{OA-TW-ICP}; DE_{OA-TW-SC}; DE_{OA-TW-ACR}\}. \quad (3.18)$$

Таким чином, завдання DE_{OA} визначення експлуатаційних переваг АНПА-РБ у порівнянні з традиційними АНПА, які на етапі зовнішнього проєктування має виконувати розробник ЗПР цього виду, полягають у розв'язку підмножин задач (5)-(8) та підзадач (9)-(11).

Наступним завданням зовнішнього проєктування АНПА-РБ згідно (2) є обґрунтування типорозмірного ряду АНПА-РБ та визначення необхідної їх кількості для забезпечення успішної охорони та захисту об'єктів МКІ.

Виходячи з досвіду НДІ ПТ, напрацьованому у морських експедиціях по обстеженню морських стаціонарних платформ та підводних магістральних газопроводів, для охорони мілководних об'єктів МКІ доцільно передбачити такі класи підводних апаратів:

- пошукові підводні апарати (ППА) — для відеообстеження, магнітометричного та гідроакустичного зондування підводного середовища, побудови карт рельєфу донної поверхні, пошуку підводних потенційно небезпечних предметів (ППНО);

- ідентифікаційно-картографічні апарати (ІКА) — для детального оптичного, гідроакустичного та магнітометричного обстеження виявлених ППНО, класифікації та картографування;

- маніпуляційно-транспортні апарати (МТА) — для захоплення, переміщення та транспортування ППНО до зон тривалого безпечного зберігання та/чи знешкодження.

Розрахунок кількості необхідних роботизованих засобів залежить від площі або протяжності об'єктів охорони, необхідної швидкості їх обстеження та рівня допустимого ризику. На основі аналізу основних об'єктів морської інфраструктури України можна визначити орієнтовну потребу в АНПА-РБ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Орієнтовна потреба у спеціальних засобах морської робототехніки для охорони об'єктів морської інфраструктури України

Об'єкт охорони	Протяжність / площа	Кількість АНПА-РБ	Основні типи апаратів
Морські порти (Одеса, Южний, Миколаїв, Херсон, Ізмаїл, Чорноморськ)	від 5 км до 30 км берегової лінії	5–10 на порт 6=30-60	ППА, ІКА
Суднохідні фарватери (Дунай, Дніпро, Південний Буг, Дністровський лиман)	до 1000 км	20–30	ППА, МТА
Морські стаціонарні платформи та бурові вежі	до 10 об'єктів	2–3 на об'єкт 20-30	ІКА, МТА
Підводні трубопроводи і кабелі зв'язку	понад 200 км	10–15	ППА, ІКА
Райони мінної небезпеки на мілководних акваторіях Чорного моря	до 500 км ²	15–20	ППА, ІКА, МТА

Таким чином, для охорони і захисту об'єктів МКІ України необхідно від 95 до 155 підводних апаратів типу АНПА-РБ. Це свідчить про актуальність завдання створення такого виду ЗПР для України та про необхідність подальших прикладних наукових досліджень за цим напрямком.

3.5 Завдання внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм

3.5.1. Формалізація порівняльного аналізу АНПА та СППА. Внутрішнє проєктування є важливим етапом у межах загального завдання проєктування АНПА-РБ. Воно передбачає формування складу, структури та взаємодії основних функціональних підсистем (енергетичної, рухової, навігаційної, інформаційної, телеметричної тощо) такого апарата у межах єдиної системи.

Це дає змогу забезпечити узгоджене функціонування всіх компонентів і виконання цільових функцій апарата під час проведення місій на мілководних морських акваторіях.

Для формалізації завдань внутрішнього проєктування АНПА-РБ необхідно повернутись до порівняльного аналізу переваг і недоліків АНПА та СППА.

Очевидно, що охоронні АНПА мають низку очевидних переваг:

- повна незалежність від судна забезпечення або берегової платформи під час виконання місії (перевага $A_{АНПА-Н}$);
- висока мобільність і можливість тривалого автономного перебування у зоні пошуку (перевага $A_{АНПА-М}$);
- зменшення ризику для персоналу, оскільки всі дії здійснюються без участі оператора у зоні потенційної небезпеки (перевага $A_{АНПА-Р}$).

Однак їхнім суттєвим недоліком є відсутність оперативного зв'язку з береговим центром керування (БЦК) під час виконання морської охоронної місії (недолік $D_{АНПА-ОЗ}$). Це обмежує можливість корекції завдань у реальному часі, моніторингу технічного стану апарата та оперативного реагування у випадку позаштатних ситуацій.

Охоронні самохідні прив'язні підводні апарати (СППА, в англomовній літературі – Remotely Operated Vehicles, ROV), навпаки, забезпечують постійний двосторонній інформаційний зв'язок із судном забезпечення або береговим центром через кабель-трос, що дозволяє оперативно (тобто, у реальному часі) керувати їх діями, передавати телеметричні дані та відеоінформацію (перевага

$A_{СППА-ОЗ}$). Проте така конструкційна схема має свої недоліки – насамперед обмежений радіус дії, визначений довжиною кабель-тросу (недолік $D_{СППА-КТ}$), а також ризики для персоналу (недолік $D_{РОВ-Р}$).

Запишемо наведені вище переваги і недоліки АНПА і СППА у вигляді двох наступних множин, що характеризують їх експлуатаційні властивості $OP_{АНПА}$ і $OP_{СППА}$ з позицій охорони і захисту об'єктів МКІ [63]:

$$OP_{АНПА} = \{A_{АНПА-Н}; A_{АНПА-М}; A_{АНПА-Р}; D_{АНПА-ОЗ}\}; \quad (3.19)$$

$$OP_{СППА} = \{A_{СППА-ОЗ}; D_{СППА-Н}; D_{СППА-Р}\}. \quad (3.20)$$

Таким чином, невирішеною частиною загальної проблеми є пошук технічного компромісу між автономністю руху та наявністю надійного зв'язку з БЦК. Саме цю нішу покликаний заповнити підводний апарат з буксируванням радіобуєм (АНПА-РБ), який дає змогу:

- зберегти високий рівень автономності та незалежності функціонування від судна забезпечення (перевага $A_{АНПА-РБ-Н} = A_{АНПА-Н}$);
- забезпечити високу мобільність і можливість тривалого автономного перебування у зоні пошуку (перевага $A_{АНПА-РБ-М} = A_{АНПА-М}$);
- зменшити ризики для персоналу, оскільки всі дії здійснюються без участі оператора у зоні потенційної небезпеки (перевага $A_{АНПА-РБ-Р} = A_{АНПА-Р}$);
- забезпечити оперативний двосторонній канал радіозв'язку між підводним апаратом і БЦК (перевага $A_{АНПА-РБ-ОЗ} = A_{СППА-ОЗ}$).

Недоліком АНПА-РБ $D_{АНПА-РБ-К}$ є ускладнення його конструкції з-за необхідності розміщувати обладнання для транспортування радіобуя, його випуску у режим буксирування для організації зв'язку з БЦК та його прийому до АНПА після завершення сеансу радіозв'язку.

Таким чином, експлуатаційні можливості АНПА-РБ можна представити наступною множиною переваг і недоліків:

$$OP_{АНПА-РБ} = \{A_{АНПА-РБ-Н}; A_{АНПА-РБ-М}; A_{АНПА-РБ-Р}; A_{АНПА-РБ-ОЗ}; D_{АНПА-РБ-К}\}. \quad (3.21)$$

3.5.2. Методологія системного підходу. Для реалізації цього технічного рішення необхідно сформулювати завдання внутрішнього проєктування такого апарата з урахуванням взаємодії його енергетичної, навігаційної, комунікаційної та конструкційної підсистем.

Сформулюємо завдання внутрішнього проєктування АНПА з буксируванням РБ як науково-методологічну основу створення такого засобу морської робототехніки для охорони та захисту мілководних об'єктів МКІ.

Для досягнення поставленої мети застосуємо методологію системного підходу [5], який дає змогу врахувати взаємодію всіх складових підводного апарата як єдиної системи, а також їх взаємодію із зовнішнім середовищем.

Додатково для обґрунтування можливості реалізації АНПА-РБ використаємо чотири рівняння існування створюваного підводного апарата як єдиної технічної системи [64].

Вказані рівняння є ефективним інструментом для перевірки проєктно-конструкторських рішень підводного апарата-робота і базуються на відомих системних критеріях [5]:

- «*Матерія*» – дають змогу перевіряти проєктно-конструкторські рішення апарата на відповідність матеріальним обмеженням технічного завдання (масо-габаритним характеристикам, плавучості тощо) та середовищу експлуатації (вимогам конструкційної міцності при дії гідростатичним та гідродинамічним навантаженням);

- «*Енергія*» – дають змогу перевіряти проєктно-конструкторські рішення апарата на відповідність вимогам технічного завдання щодо забезпечення споживачів енергією необхідних типів та якості під час виконання підводних місій;

- «*Інформація*» – дають змогу перевіряти проєктно-конструкторські рішення апарата на відповідність вимогам технічного завдання щодо інформаційного забезпечення процесів функціонування підводного апарата (наявність необхідних каналів сприйняття, передачі та оброблення інформації);

- «*Корисна функція*» – дають змогу перевіряти проєктно-конструкторські рішення апарата на відповідність вимогам технічного завдання щодо реалізації

необхідних режимів роботи апарата для досягнення поставлених цілей місії з визначеною ефективністю.

3.5.3. Сутність внутрішнього проєктування АНПА-РБ для охорони об'єктів МКІ на мілководних акваторіях. Внутрішнє проєктування є комплексним процесом, спрямованим на розроблення структури, компонентного складу та взаємодії основних систем апарата, що забезпечують його функціонування як цілісного інженерно-технічного комплексу охоронного призначення.

Сутність цього етапу полягає у формуванні взаємопов'язаної архітектури підводного апарата, яка інтегрує корпусно-механічні, енергетичні, інформаційно-керуючі підсистеми з урахуванням умов експлуатації на мілководних акваторіях і специфічних завдань охорони морської критичної інфраструктури (портів, нафтогазових терміналів, підводних трубопроводів, кабельних ліній тощо).

Як показано у [60], до генеральної множини основних завдань внутрішнього проєктування DI АНПА-РБ відносяться наступні завдання:

- розробки принципів функціонування механізму розгортання (випускання) РБ та згортання (повернення до АНПА) РБ DI_{DPO} ;
- дослідження гідродинаміки РБ як невід'ємної теоретичної складової його інженерного проєктування DI_{DH} ;
- розробки узагальненого алгоритму роботи системи керування обладнанням розгортання та згортання РБ, що має забезпечити узгоджене функціонування ложемента і лебідкою кабель-буксира DI_{DCS} (цю частину проєктних робіт віднесемо до спеціальності автоматичного керування АНПА).

Наведені основні завдання доповнимо наступними додатковими завданнями, які утворюють повну множину DI завдань внутрішнього проєктування АНПА-РБ:

- завдання деталізації технічних характеристик АНПА DI_{TS} та радіобуя DI_{TS-RB} відповідно до сформульованих завдань зовнішнього проєктування DI ;
- завдання вибору та обґрунтуванню архітектурно-конструктивних рішень для корпусу АНПА DI_B , його пропульсивного комплексу DI_{PC} та енергетичної системи DI_{ES} , для систем навігації DI_N і зв'язку DI_C , для управління підводним

апаратом DI_M і його змінним приладовим та інструментальним обладнанням DI_{M-P} , призначеним для проведення охоронних місій за призначенням АНПА-РБ;

- завдання формування внутрішнього компонування обладнання АНПА DI_{IC} та оптимізація розподілу мас DI_{MO} для забезпечення стійкості, маневреності та енергоефективності руху;

- завдання вибору архітектурно-конструктивних рішень для корпусу радіобуя DI_{B-RB} , його енергетичної системи DI_{ES-RB} , систем навігації DI_{N-RB} , управління DI_{M-RB} і зв'язку DI_{C-RB} ;

- завдання формування внутрішнього компонування обладнання радіобуя DI_{IC-RB} та оптимізація розподілу мас DI_{MO-RB} для забезпечення стійкості, маневреності та енергоефективності руху;

- завдання DI_{CS} розроблення інформаційно-керуючої структури АНПА-РБ, що забезпечує стійке управління рухом, позиціонування та передачу даних у складних гідрометеорологічних умовах мілководдя;

- завдання DI_{TM} розробки переліку робіт технічного обслуговування АНПА-РБ, безпеки експлуатації та ремонтпридатності систем.

Тобто, генеральна множина завдань внутрішнього проектування має вид:

$$\begin{aligned} DI = \{ & DI_{DPO}; DI_{DH}; DI_{DCS}; DI_{TS}; DI_{TS-RB}; DI_B; DI_{PC}; DI_{ES}; DI_N; DI_C; \\ & DI_M; DI_{M-P}; DI_{IC}; DI_{MO}; DI_{B-RB}; DI_{ES-RB}; DI_{N-RB}; DI_{M-RB}; DI_{C-RB}; \\ & DI_{IC-RB}; DI_{MO-RB}; DI_{CS}; DI_{TM} \}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Результатом внутрішнього проектування є комплексна технічна концепція АНПА-РБ, яка дає змогу перейти до етапів його проектування згідно вимогам ЄСКД, подальшого будівництва дослідного зразка та його заводських в морських натурних випробувань.

3.5.4. Наукове обґрунтування окремих завдань внутрішнього проектування підводного апарата з радіобуєм. Як показує аналіз множини переваг і недоліків АНПА-РБ (3), на стадії внутрішнього проектування підводного апарата найбільш актуальним з позицій наукового обґрунтування технічних рішень є питання:

- дослідження гідродинамічних властивостей та конструкції РБ і
- проектування обладнання АНПА для застосування РБ за призначенням – його транспортування, випуск у режим буксирування для організації зв'язку з БЦК та прийом РБ до АНПА після завершення сеансу радіозв'язку.

Тому далі розглянемо основні наукові задачі $M_{АНПА-РБ}$ внутрішнього проектування АНПА-РБ більш детально, акцентуючи увагу на саме цих питаннях.

Сформуємо наукові задачі внутрішнього проектування АНПА-РБ у складі двох складових:

- наукові задачі $M_{АНПА}$ проектування АНПА як носія корисного вантажу – буксируваного радіобуя зв'язку і змінного приладового та інструментального обладнання, призначеного для проведення охоронних місій за призначенням АНПА-РБ;

- наукові задачі $M_{РБ}$ проектування буксируваного радіобуя як носія радіо- та супутникової апаратури для двостороннього інформаційного обміну з БЦК.

Тобто, має місце залежність:

$$M_{АНПА-РБ} = \{M_{АНПА}; M_{РБ}\}. \quad (3.23)$$

Перша складова внутрішнього проектування – автономний ненаселений підводний апарат – охоплює традиційні задачі наукового обґрунтування конструкторських рішень АНПА як засобу підводної робототехніки [6, 61].

Такі задачі доцільно представити деякою множиною взаємопов'язаних наукових задач $M_{АНПА} \subset DI$, що ґрунтуються на застосуванні методології системного підходу [5, 22].

Згідно з цим множину задач $M_{АНПА}$ представимо чотирма основними підмножинами:

- підмножиною $M_{АНПА-М} \subset DI$ гідродинамічних та конструктивно-компоновочних задач (критерій системного підходу «Матерія»);
- підмножиною $M_{АНПА-Е} \subset DI$ задач енергетики підводного апарата (критерій системного підходу «Енергія»);
- підмножиною $M_{АНПА-І} \subset DI$ інформаційно-керуючих задач (критерій системного підходу «Інформація»);

- підмножиною $M_{АНПА-КФ} \subset DI$ задач оцінки відповідності створюваного АНПА вимогам технічного завдання (критерій системного підходу «Корисна функція»).

У якості прикладу розглянемо змістовну частину цих задач більш детально.

До задач $M_{АНПА-М}$ віднесемо:

- розроблення гідродинамічної форми корпусу АНПА з мінімальним опором руху та достатньою остійністю під час маневрування (задача $M_{АНПА-М-Г}$);

- вибір матеріалів корпусу АНПА, що забезпечують міцність, герметичність та корозійну стійкість при експлуатації в морській воді (задача $M_{АНПА-М-К}$);

- розроблення схеми розміщення рушійно-рульового комплексу АНПА для досягнення високої керованості в обмежених просторах при роботі на інженерних спорудах морського шельфу, портових гідротехнічних спорудах тощо (задача $M_{АНПА-М-Р}$);

- розроблення складу, принципів функціонування та конструкції обладнання АНПА, призначеного для транспортування та застосування за призначенням буксируваного радіобуя (задача $M_{АНПА-М-ОРБ}$); зазначимо, що вказана задача не є тривіальною, оскільки вона вимагає розробки нових проєктно-технічних рішень щодо конструкції (наприклад, ложементу для РБ) і на даний час потребує окремого розгляду;

- розроблення складу, принципів функціонування та конструкції обладнання АНПА, призначеного для зберігання, транспортування та застосування за призначенням змінного обладнання, необхідного для виконання пошукових та охоронних місій АНПА-РБ (задача $M_{АНПА-М-ОПО}$).

До задач $M_{АНПА-Е}$ проєктування АНПА віднесемо:

- задачу розроблення системи енергозабезпечення споживачів АНПА (задача $M_{АНПА-Е-ПА}$);

- задачу розроблення системи енергозабезпечення споживачів РБ (задача $M_{АНПА-Е-РБ}$);

- задачу розроблення системи енергозабезпечення споживачів змінного обладнання, необхідного для виконання пошукових та охоронних місій АНПА-РБ (задача $M_{АНПА-Е-ОПО}$).

До задач $M_{АНПА-I}$ проєктування АНПА віднесемо:

- задачу розроблення системи інформаційного забезпечення складових АНПА (задача $M_{АНПА-I-ПА}$);

- задачу розроблення системи інформаційного забезпечення складових РБ (задача $M_{АНПА-I-РБ}$);

- задачу розроблення системи інформаційного забезпечення споживачів змінного обладнання, необхідного для виконання пошукових та охоронних місій АНПА-РБ (задача $M_{АНПА-I-ОПО}$).

До задач $M_{АНПА-КФ}$ проєктування АНПА віднесемо:

- комплексну задачу забезпечення всіх проєктних режимів функціонування АНПА згідно технічному завданню (задача $M_{АНПА-КФ-ПА}$);

- комплексну задачу забезпечення всіх проєктних режимів функціонування РБ (задача $M_{АНПА-КФ-РБ}$);

- комплексну задачу забезпечення всіх проєктних режимів функціонування змінного обладнання, необхідного для виконання пошукових та охоронних місій АНПА-РБ (задача $M_{АНПА-КФ-ОПО}$).

Друга складова внутрішнього проєктування – буксирований радіобуй як носій радіо- та супутникової апаратури для двостороннього інформаційного обміну з БЦК – охоплює як традиційні задачі наукового обґрунтування конструкторських рішень АНПА як засобу підводної робототехніки [65], так і інноваційні проєктно-конструкторські рішення [66, 67].

Такі задачі також представимо деякою множиною взаємопов'язаних прикладних наукових задач $M_{РБ} \subset DI$, що ґрунтуються на застосуванні методології системного підходу.

Тоді множину задач $M_{РБ}$ проєктування радіобуя також представимо чотирма основними підмножинами:

- підмножиною $M_{PB-M} \subset DI$ гідродинамічних та конструктивно-компоновочних задач (критерій системного підходу «Матерія»);
- підмножиною $M_{PB-E} \subset DI$ задач енергетики буксируваного радіобуя (критерій системного підходу «Енергія»);
- підмножиною $M_{PB-I} \subset DI$ інформаційно-керуючих задач (критерій системного підходу «Інформація»);
- підмножиною $M_{PB-KF} \subset DI$ задач оцінки відповідності створюваного РБ вимогам технічного завдання (критерій системного підходу «Корисна функція»).

У якості прикладу розглянемо змістовну частину цих задач більш детально.

До задач M_{PB-M} проєктування РБ віднесемо:

- розроблення гідродинамічної форми корпусу РБ та його несучих поверхонь, які б забезпечували мінімальний гідродинамічний опір підводного апарата при його русі без розгорнутого для буксирування РБ та одночасно забезпечувала б необхідну підйомну силу радіобуя при його буксируванні в режимі інформаційного обміну з БЦК (задача M_{PB-M-I}); зазначимо, що успішний розв'язок цієї задачі на практиці стикається з необхідністю збільшувати поперечний перетин АНПА з-за великого розмаху крил (несучих поверхонь) буксируваного радіобуя, тому вказана задача також не є тривіальною і на даний час потребує окремого розгляду;

- вибір матеріалів корпусу РБ, що забезпечують міцність, герметичність та корозійну стійкість при експлуатації в морській воді (задача M_{PB-M-K});

- розроблення конструкції РБ, яка б забезпечувала підйом/опускання антен зв'язку з БЦК та достатню його остійність під час буксирування (задача M_{PB-M-P}); зазначимо, що вказана задача теж не є тривіальною, тому також потребує окремого розгляду.

До задач M_{PB-E} проєктування РБ віднесемо задачу розроблення системи енергозабезпечення апаратури радіо- та супутникового зв'язку (задача M_{PB-E-3}), виконавчих механізмів підйому/опускання антен зв'язку (задача M_{PB-E-A}) та виконавчих механізмів, які забезпечують необхідну остійність РБ в режимі його буксирування (задача M_{PB-E-O}).

До задач M_{PB-I} проектування РБ віднесемо задачу розроблення системи інформаційного забезпечення апаратури радіо- та супутникового зв'язку (задача M_{PB-I-3}), виконавчих механізмів підйому/опускання антен зв'язку (задача M_{PB-I-A}) та виконавчих механізмів, які забезпечують необхідну остійність РБ в режимі його буксирування (задача M_{PB-I-O}).

До задач $M_{PB-K\Phi}$ проектування РБ віднесемо комплексні задачі забезпечення всіх проектних режимів функціонування апаратури радіо- та супутникового зв'язку (задача $M_{PB-K\Phi-3}$), виконавчих механізмів підйому/опускання антен зв'язку (задача $M_{PB-K\Phi-A}$) та виконавчих механізмів, які забезпечують необхідну остійність РБ в режимі його буксирування (задача $M_{PB-K\Phi-O}$).

Таким чином, множина (5) основних наукових задач внутрішнього проектування АНПА-РБ $M_{АНПА-РБ}$ може бути представлена підмножинами:

$$M_{АНПА} = \{M_{АНПА-М-Г}; M_{АНПА-М-К}; M_{АНПА-М-Р}; M_{АНПА-М-ОРБ}; M_{АНПА-М-ОПО}; M_{АНПА-Е-ПА}; M_{АНПА-Е-РБ}; M_{АНПА-Е-ОПО}; M_{АНПА-І-ПА}; M_{АНПА-І-РБ}; M_{АНПА-І-ОПО}; M_{АНПА-К\Phi-ПА}; M_{АНПА-К\Phi-РБ}; M_{АНПА-К\Phi-ОПО} \}. \quad (3.24)$$

$$M_{РБ} = \{M_{РБ-М-Г}; M_{РБ-М-К}; M_{РБ-М-Р}; M_{РБ-Е-3}; M_{РБ-Е-А}; M_{РБ-Е-О}; M_{РБ-І-3}; M_{РБ-І-А}; M_{РБ-І-О}; M_{РБ-К\Phi-3}; M_{РБ-К\Phi-А}; M_{РБ-К\Phi-О} \}. \quad (3.25)$$

Підмножини (6) і (7) утворюють науково-методологічне підґрунтя для організації процесів внутрішнього проектування АНПА-РБ.

Далі розглянемо можливі варіанти розв'язку трьох нетривіальних задач, які входять до підмножин (6) і (7) – задач $M_{АНПА-М-ОРБ}$, $M_{РБ-М-Г}$ та $M_{РБ-М-Р}$.

Розв'язок задач $M_{АНПА-М-ОРБ} \in M_{АНПА-М} \subset DI$ та $M_{РБ-М-Р} \in M_{РБ-М} \subset DI$ передбачає конструювання обладнання АНПА, призначеного для транспортування та застосування радіобуя (ОРБ). Виходячи з принципів системного підходу (критерій «Корисна функція») сформулюємо основні режими роботи ОРБ за умови прямолінійного усталеного руху АНПА:

- режим транспортування РБ у початковому (згорнутому) положенні, у якому радіобуй закріплено на висувному ложементі (ВЛ) за допомогою фіксатора

висувного ложементу (Ф), оснащеного приводом фіксатора (ПФ), а сам ВЛ знаходиться у нижньому положенні всередині зовнішнього корпусу АНПА; при цьому, стулки висувного ложементу (СВЛ) закриті, що виключає негативний вплив РБ на величину гідродинамічного опору АНПА (рис. 1,а); крім того, гальмо лебідки кабель-буксиру (ЛКБ) утримує привод лебідки у загальмованому стані (тут і далі вказане обладнання лебідки кабель-буксиру на рисунках не показано з-за тривіальності технічних рішень);

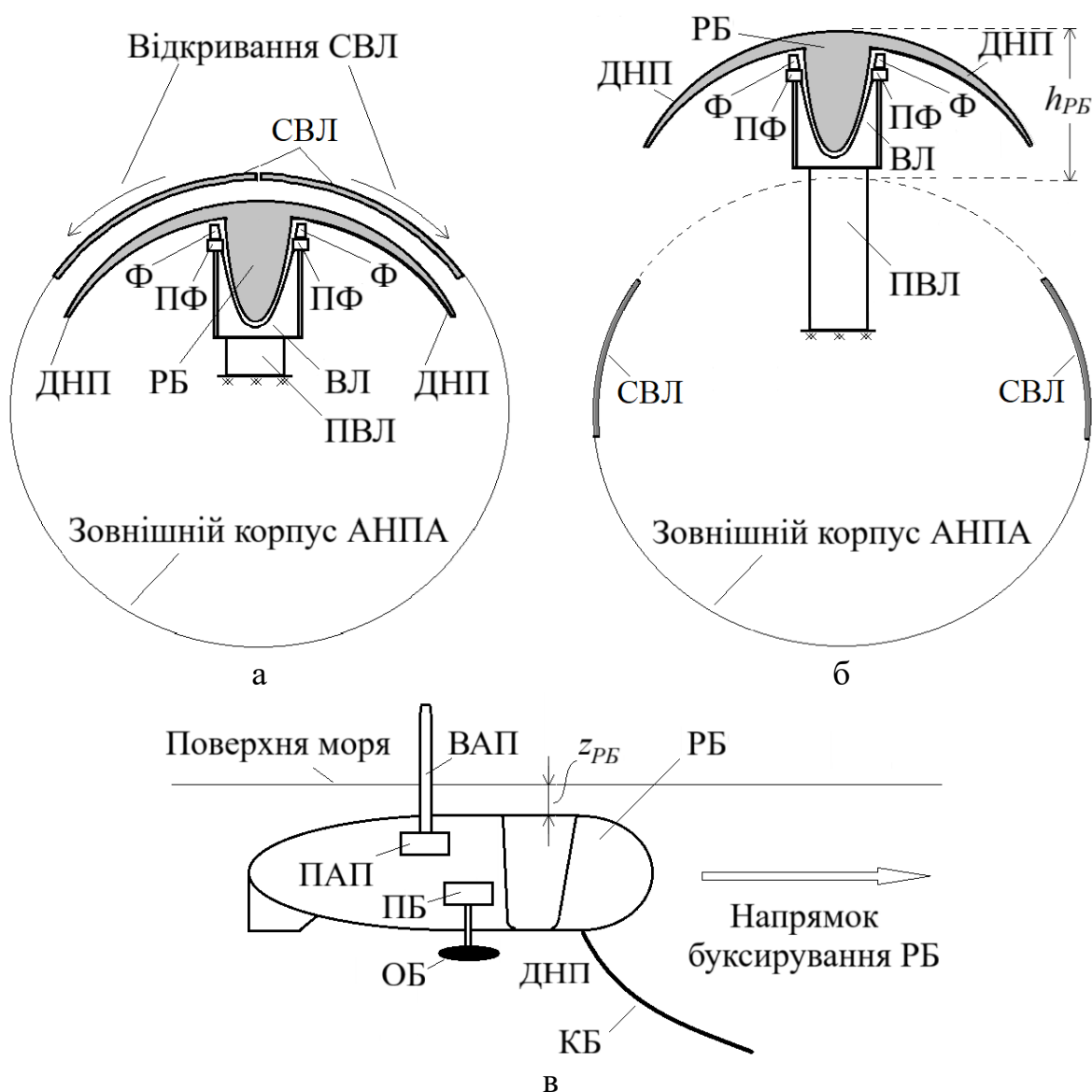


Рисунок 3.6 – Узагальнена схема обладнання АНПА для транспортування та застосування за призначенням радіобуя

- режим підготовки до застосування РБ, у якому СВЛ відкриваються приводом стулок ложементу (ПСЛ, на рис. 1 не показано), а сам ВЛ висувається у верхнє положення за допомогою привода висувного ложементу (ПВЛ); при цьому ЛКБ попускає кабель-буксир (КБ) на довжину, достатню для підйому РБ з ВЛ на висоту $h_{РБ}$ над корпусом АНПА, достатню для появи на дугових несучих поверхнях РБ (ДНП) підйомної гідродинамічної сили (рис. 1,б);

- режим спливання РБ у підповерхневий шар моря шляхом поступового керованого попускання кабель-буксира лебідкою КБ; попускання КБ припиняється, коли заглиблення радіобуя $z_{РБ}$ достатнє для роботи його висувних антенних пристроїв (ВАП) (рис.1,в); при цьому стулки висувного ложементу закриваються, залишаючи вільним вихід для КБ;

- режим випуску ВАП, які піднімаються за допомогою привода антенного пристрою (ПАП); одночасно з цим за допомогою привода баласту (ПБ) з корпусу РБ вниз переміщується опускний баласт (ОБ), який забезпечує необхідну остійність радіобую під час його буксирування;

- режим керованої зміни довжини попущеної частини КБ за допомогою ЛКБ; такий режим реалізується для збереження неперервного зв'язку з БЦК, коли АНПА змінює глибину занурення або при наявності значного хвилювання морської поверхні.

Таким чином, додаткове обладнання АНПА для роботи з РБ включає:

- висувний ложемент для розміщення РБ, який забезпечує його фіксацію в транспортному положенні;

- механізм висування ложементу з РБ у потік води, який реалізується у вигляді телескопічної або шарнірно-важільної системи, здатної розгортати РБ у режим буксирування без порушення стійкості підводного апарата;

- портативну лебідку з кабель-буксиром, яка забезпечує контрольоване розгортання і підйом РБ, регулювання натягу КБ залежно від швидкості руху апарата та глибини занурення;

- механізм висування антенних пристроїв РБ для зв'язку з БЦК та механізм опускання/піднімання баласту РБ;

- систему датчиків натягу, швидкості та кута буксирування, які передають інформацію до бортової системи управління для синхронізації рухів АНПА і РБ.

Далі, розв'язок задачі $M_{РБ-М-Г} \in M_{РБ-М} \subset DI$ складається з розв'язку двох основних підзадач – розроблення гідродинамічної форми корпусу РБ $M_{РБ-М-ГК}$ та його несучих поверхонь $M_{РБ-М-ГНП}$. Виходячи з того, що гідродинаміка буїв досить глибоко вивчена [68], далі у роботі розглянемо особливості розв'язку підзадачі $M_{РБ-М-ГНП}$, яка полягає у розробці та дослідженні властивостей дугової несучої поверхні (ДНП) радіобуя.

Висновки до розділу 3.

1. Прикладне наукове завдання удосконалення проєктування засобів морської робототехніки для охорони об'єктів МКІ пропонується розв'язувати у складі трьох послідовних етапів – концептуального, зовнішнього і внутрішнього проєктування.

2. Для етапу концептуального проєктування запропоновано тривимірну матрицю «Об'єкт МКІ IC – Охоронна робота на об'єкті МКІ J_{IC} – Ефективність охорони об'єкта МКІ EC », яка дає змогу оцінити ефективність конкретного типу морського робота при його застосуванні у роботах з охорони об'єктів МКІ українського шельфу. Тривимірна матриця утворює науково-методичне підґрунтя для оцінки доцільності застосування даного засобу морської робототехніки у морській практиці.

3. Обґрунтовано доцільність розширення переліку традиційних типів морських робіт більш продуктивним роботом нового архітектурно-конструктивного типу – АНПА-РБ, який поєднує переваги АНПА та СППА.

4. На основі аналізу функціонального призначення АНПА-РБ для роботи у мілководних зонах та шляхом залучення методології системного підходу сформульовано чотири взаємопов'язані підмножини завдань зовнішнього проєктування, а саме:

- конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, спрямовані на визначення оптимальних форм, розташування модулів та характеристик руху АНПА-РБ у морському середовищі;

- завдання енергетики АНПА-РБ, які стосуються розробка методики оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу АНПА-РБ, яка матиме місце під час періодичного руху підводного апарата без радіозв'язку з БЦК;

- інформаційно-комунікаційні та керуючі завдання, що включають оцінку попередніх проєктних рішень щодо забезпечення необхідної точності позиціонування, надійності зв'язку та ефективності системи автоматичного керування АНПА-РБ;

- завдання ефективного застосування, які охоплюють визначення цільового призначення АНПА-РБ та формування переліку основних робіт, які має виконувати АНПА-РБ. включаючи визначення принципів взаємодії з іншими морськими платформами та береговими центрами управління.

Це утворює науково-методологічну основу зовнішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируваним радіобуєм, яка може бути використана для оцінки перспективності його створення та визначення технічних вимог до подальших етапів внутрішнього проєктування.

5. Розкрито особливості внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируваним радіобуєм як процесу, спрямованого на забезпечення узгодженої взаємодії механічних, енергетичних, навігаційних, інформаційно-керуючих і комунікаційних підсистем під час виконання завдань охорони об'єктів морської критичної інфраструктури.

Визначено, що для апаратів, які працюють у мілководних акваторіях, ключовим чинником ефективності є глибока інтеграція засобів зв'язку з конструкцією обладнання АНПА та РБ, що забезпечується через використання буксируваного радіобуя з дуговими несучими поверхнями, узгодженими з гідродинамічним профілем апарата.

6. На основі системного підходу сформовано та обґрунтовано генеральну множину основних завдань внутрішнього проєктування АНПА-РБ та підмножину основних наукових задач для їх виконання, що утворює науково-методологічну основу внутрішнього проєктування такого виду підводної робототехніки. Результати проведеного аналізу свідчать, що застосування системного підходу до внутрішнього проєктування дозволяє створити багатоцільову технічну платформу для виконання охоронних, моніторингових і протимінних місій у прибережних зонах, де традиційні рішення з радіозв'язком та енергозабезпечення є малоефективними.

7. Запропонована методологічна основа внутрішнього проєктування може бути використана для подальшої розробки типорозмірного ряду підводних апаратів із буксируемими радіобуями різного призначення — від науково-дослідних до

оборонних і гуманітарних застосувань, зокрема для моніторингу та охорони критичної морської інфраструктури України.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ ДУГОВОГО КРИЛА ПРИ КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РУСІ БУКСИРУВАНОВОГО РАДІОБУЯ

4.1 Застосування теорії крила в суднобудуванні й авіабудуванні та постановка задачі

Інтенсивний розвиток засобів морської робототехніки та, зокрема, підводних апаратів різного призначення, потребує пошуку нових архітектурно-конструктивних типів їх корпусів та, зокрема, застосування у їх складі несучих поверхонь (крил) нетрадиційної форми. Це, у свою чергу, вимагає подальшого розвитку теорії крила, створення та використання дугових крил, які поряд із заданими гідродинамічними характеристиками забезпечували б високі експлуатаційні характеристики корпусу підводного апарату.

Традиційно застосування теорії крила в суднобудуванні характеризується його використанням при створенні несучих елементів суден з динамічними принципами підтримки, а саме суден на підводних крилах, при створенні активних систем заспокоювачів качки і при створенні підводних човнів та автономних підводних апаратів як активних рулів.

Так, для суден на підводних крилах на корпусі встановлюються спеціальні крила (фойли), які при досягненні певної швидкості створюють гідродинамічну підіймальну силу. Це підіймає корпус судна над водою, радикально зменшуючи опір тертя та хвильовий опір [69].

Далі, судна-екраноплани використовують «ефект екрану» – збільшення підіймальної сили крила під час руху на малій висоті над водною поверхнею. Теорія крила тут поєднує аеродинаміку (повітряна подушка під крилом) та морехідні якості [70].

Крім того, сучасна теорія гвинта розглядає лопать гвинтового рушія як крило. Розрахунок тяги базується на циркуляції потоку навколо профілю лопаті, аналогічно до того, як розраховується підіймальна сила літака [71].

Цікавим застосуванням теорії крила у суднобудуванні є застосування жорстких вітрил на спортивних яхтах та вантажних суднах. Такі "крила-вітрила" працюють як вертикальні аеродинамічні крила. Вони генерують тягу за рахунок різниці тисків, що описується рівнянням Бернуллі [72].

І, звичайно, теорія крила традиційно застосовується при створенні засобів стабілізації та керування морськими рухомими об'єктами (руль судна, заспокоювач хитами у вигляді активних бокових крил). Вони розраховуються за принципами теорії несучих поверхонь для створення необхідних моментів сили при маневруванні таких об'єктів [73].

Характерною особливістю наведених вище прикладів є використання прямолінійних (плоских) крил. Тому їх використання у конструкції буксированого РБ, де згідно з п. 1.3.2 пропонується використання дугових крил, є неприйнятним.

Огляд науково-технічної літератури показав, що використання дугових крил мало місце в авіабудуванні. Такі крила наприкінці 1920-х років вперше запропонував американський інженер Вільям Кастер (Willard Custer) як концепцію каналного крила (Channel Wing) [74].

Аеродинамічний профіль такого крила для літака має форму напівкруглого повітропроводу з штовхаючим гвинтом, встановленим поблизу задньої кромки крила (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Літаки з дуговими крилами

Незважаючи на потенціал застосування літаків з таким крилом для коротких злетів та посадок, попередні дослідження виявили такі проблеми, як збільшення опору, відрив потоку та моменти кидання, викликані тягою. Однак, з появою сучасних вимірювальних систем та методів візуалізації потоку, зарубіжні науковці відновлюють дослідження таких арочних (дугових) крил [75].

Застосування дугових крил на цей час вже поширюється й на підводну техніку. Так, виявлено рекламний буклет фірми «KRAKEN» (Велика Британія) [76], у якому носові плавники АНПА мають дугоподібну форму, рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Автономний ненаселений підводний апарат «K4 MANTA»

Однак, ніяких цифрових даних та інженерних пояснень щодо доцільності такої конструкції носових плавників у буклеті не наводиться.

Виконаний огляд та аналіз конструкцій несучих поверхонь (крил) у суднобудуванні та авіабудуванні свідчить, що для широкого застосування дугових крил у конструкціях засобів морської робототехніки необхідно дослідити їх властивості та розробити теоретичні основи проектування їх конструкції.

У зв'язку з цим актуальним є третє завдання дисертаційного дослідження (див. п.р. 2.1) – дослідження гідродинамічних властивостей (характеристик)

дугових несучих поверхонь буксируваного РБ, які геометрично та гідродинамічно узгоджені з формою корпусу АНПА-буксирувальника.

Для реалізації цього завдання необхідно виготовити модель дугового крила та виконати експериментальні дослідження дослідити його гідродинамічних характеристик.

4.2 Особливості застосування дугового крила у конструкції буксируваного радіобуя

При русі в товщі води на радіобуй діють такі основні сили (рис.4.3):

- G – сила тяжіння, прикладена в центрі мас бую, спрямована до землі;
- F_A – сила плавучості, що виштовхує, прикладена в центрі величини бую, спрямована вгору;
- Y – гідродинамічна підймальна сила;
- X – сила лобового опору;
- P – сила тяги, як правило, спрямована вздовж головної будівельної осі бую; напрям її дії може не проходити через центр мас, а бути вищим або нижчим за нього;
- R_A – повна гідродинамічна сила ніколи не проходить через центр мас.

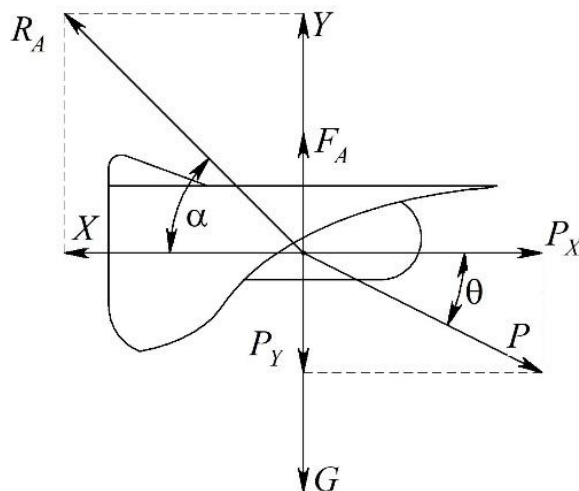


Рисунок 4.3 – Сили, що діють на буксирований радіобуй

Перенесення до центру мас сили тяги (сили буксирування від кабель-буксиру) та гідродинамічної сили за правилами механіки призводить до появи моменту тяги та моменту гідродинамічної сили.

Сумарний момент цих сил як вектор може бути спроектований на осі зв'язаної системи координат $(0x, 0y, 0z)$.

У цій системі координат вісь x спрямована вздовж поздовжньої (будівельної) осі буя, вісь y лежить у вертикальній площині симетрії буя і направлена вгору, вісь z направлена на праве крило.

Проекції сумарного моменту на осі x, y, z називаються моментами крену, ковзання і тангажу відповідно і позначаються M_x, M_y, M_z .

Найбільшу увагу в гідромеханіці буя необхідно приділяти моменту тангажу M_z , оскільки більшість маневрів буй здійснює у вертикальній площині: підйом та посадка, рух по прямій, зміна глибини.

Для здійснення різних режимів руху потрібна повна або часткова рівновага зовнішніх сил та моментів, що діють на об'єкт.

Умови рівноваги записуються так:

$$\begin{aligned} \sum X &= 0 & \sum M_x &= 0 \\ \sum Y &= 0 & \sum M_y &= 0 \\ \sum Z &= 0 & \sum M_z &= 0 \end{aligned} \tag{4.1}$$

У горизонтальному русі, що встановився, в рівняннях:

- ліві частини дорівнюватимуть нулю (швидкість постійна і не залежить від часу);

- кут нахилу траєкторії дорівнює нулю і не змінюється (горизонтальний рух),

- мають місце відношення: $\cos\alpha = 1, \sin\alpha = 0$ (кут атаки малий).

Іншими словами, виконуються дві наступні умови:

– умова сталості глибини $H = const$:

$$Y + F_A - G - P_Y = 0 \tag{4.2}$$

– умова сталості швидкості $V = const$:

$$P_x - X = 0 \quad (4.3)$$

Форма крила обумовлена забезпеченням мінімального гідродинамічного опору АНПА в пасивному режимі роботи радіобуя. Тобто. при неактивному (невипущеному) радіобуї він має бути зафіксований у вирізі гідродинамічного обтічника АНПА. Це дозволяє зберігати незмінними габарити а, значить, і гідродинамічний опір АНПА і рухатись на максимально високій швидкості.

У разі застосування радіобуя з традиційним (плоским) крилом його розміщення на борту АНПА вимагало б застосування в конструкції апарату спеціального ангару, що збільшило б габарити АНПА і суттєво змінило його гідродинамічні характеристики з-за виступаючих частин (їх опір тертя і опір форми може становити значну частину в загальному балансі гідродинамічного опору (до 30...40%) [77].

Для забезпечення найкращих гідродинамічних характеристик, з урахуванням низької швидкості буксирування РБ, форма крила вибирається дуговою трапецієподібною [78]. Для подальших чисельних розрахунків задаємось розмірами крила, наведеними на рис. 4.4.

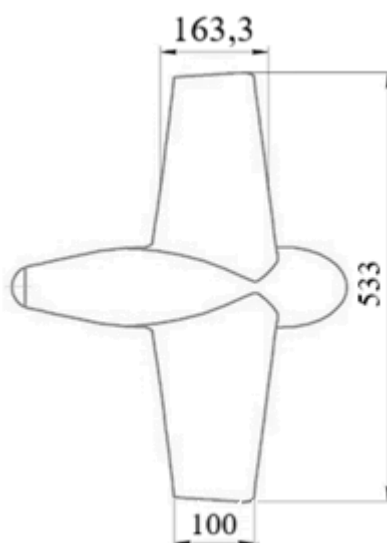


Рисунок 4.4 – Габаритні розміри крила буя

Тоді площа крила $S_{лр} = 0,07 \text{ м}^2$, подовження крила $\lambda = 4,05$, звуження крила $\eta = 1,163$.

Про цьому зауважимо, що звуження крила для руху на малих швидкостях не повинно перевищувати 3.

Якщо розглянути формування підйомної сили, можна побачити (рис. 4.5) що з переміщенням вздовж крила ця сила поступово змінює свій напрям і на самому кінці крила діє горизонтально, у бік корпусу буя.

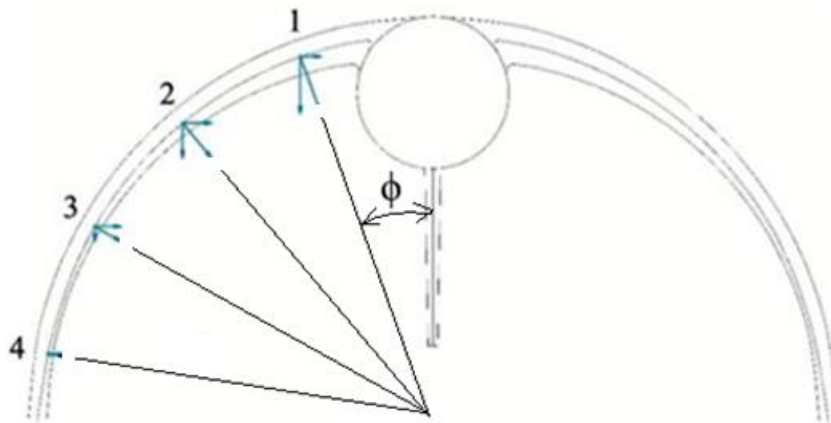


Рисунок 4.5 – Формування підйомної сили вздовж дугового крила:

1 – $\phi=20^\circ$; 2 – $\phi=40^\circ$; 3 – $\phi=60^\circ$; 4 – $\phi=80^\circ$

Це означає, що при буксируванні на кінцях крила формуватимуться вихори, які впливатимуть на стабільність руху буя за курсом. Крім того, горизонтальна складова підйомної сили на кінцях крила створюватиме момент обертання, який негативно впливатиме на стабільність положення буя під час руху.

Отже, під час буксирування на кінцях крил утворюватимуться вихори, які впливатимуть на курсову стійкість буя. Крім того, горизонтальна складова підйомної сили на кінцях крил генеруватиме крутний момент, який негативно впливає на стійкість буя під час руху.

Якщо припустити, що кут атаки не змінюється, то, згідно з теорією Жуковського [79], безрозмірний коефіцієнт підйомної сили C_y вздовж усієї довжини крила буде постійним.

Підйомна сила крила тоді визначається як

$$Y = 0,5 \cdot C_y \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 \quad (7)$$

і матиме постійне значення, а горизонтальна та вертикальна складові підйомної сили становитимуть

$$Y_x = Y \cdot \sin \phi; \quad (8)$$

$$Y_y = Y \cdot \cos \phi, \quad (9)$$

де ϕ – кут відхилення підйомної сили від вертикалі.

У цьому випадку безрозмірний коефіцієнт підйомної сили становить

$$C_y = 2m(\alpha - \alpha_0), \quad (10)$$

де: α – кут атаки;

α_0 – кут атаки, при якому підйомна сила дорівнює нулю;

m – коефіцієнт, що залежить від форми профілю крила.

Результати попереднього розрахунку оцінки наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Попередня порівняльна оцінка складових підйомної сили дугового крила з незмінним та змінним вздовж довжини крила кутом атаки

Точка	Кут ϕ , град.	$\sin \phi$	$\cos \phi$	Кут α , град.	Плече h , м	Складові підйомної сили Y , Н				Момент M , Нм	
						Без зміни α		Зі зміною α		Без змін α	Зі зміною α
						Y_x	Y_y	Y_x	Y_y		
1	20	0.342	0.939	4.36	0.090	71.77	197.19	62.58	171.95	6.46	5.63
2	40	0.642	0.766	3.19	0.166	134.88	165.75	102.56	102.56	12.14	7.75
3	60	0.866	0.5	2	0.239	181.73	104.92	41.69	41.67	16.36	6.54
4	80	0.984	0.04	0.04	0.306	206.66	36.44	1.65	0.29	18.6	0.149

Порівняння ефективного крутного моменту для фіксованого кута атаки та для кута атаки, що змінюється вздовж довжини крила (табл. 4.1) показує, що крутний момент в останньому випадку значно зменшується, тоді як при фіксованому куті атаки крутний момент постійно зростає.

Для спрощення конструкції буя та зменшення його масо-габаритних характеристик крило не механізоване і його гідродинамічні характеристики незмінні. Тому для зменшення впливу вихроутворення на траєкторію руху та зменшення навантаження на закінцівки крила в його конструкцію було включено аеродинамічне кручення, яке реалізується шляхом поступової зміни кута атаки вздовж лінії (розмаху) крила. Тобто по мірі просування по довжині крила змінюється його кут атаки α , а при куті відхилення 15° від горизонтальної площини змінюється ще й профіль крила.

Основний аеродинамічний профіль, що використовується для крила, базується на відомому профілі ЦАГІ Р-11 з відносною товщиною 0,12. У кореневій частині крила кут атаки становить $\alpha = 5^\circ$. З інтервалами 15° кут атаки зменшується на 1° , і коли кут атаки наближається до нуля, профіль крила стає профілем SIBNIA (симетричним) з відносною товщиною профілю 0,12.

Примітка: Наведені вище пропозиції щодо зміни профілю дугового крила вздовж його довжини внесені канд. техн. наук, доцентом Бабкіним Г.В.

При такій побудові крила його кінці діють як стабілізатори курсу і разом зі стабілізатором хвостового оперення буксируваного радіобуя мають забезпечувати його стабілізацію під час прямолінійного руху.

Дані щодо аеродинамічного профілю були отримані з [80].

4.3 Застосування технології CFD-моделювання для дослідження дугового крила буксируваного радіобуя

CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) – це чисельне відтворення руху рідин і газів у віртуальному середовищі на основі рівнянь гідро- та газодинаміки (передусім рівнянь Нав'є-Стокса) [81].

У практиці виконання досліджень і проєктування засобів морської робототехніки CFD використовують для прогнозування гідро- та аеродинамічних характеристик корпусів підводних і надводних морських рухомих об'єктів, оптимізації форми та режимів роботи таких об'єктів, аналізу гідродинамічних навантажень та збурень, а також для зменшення обсягу та витрат часу фізичних випробувань.

Для морської робототехніки це є особливо важливим при оцінці опору руху, маневровості підводного апарата і впливу зовнішніх потоків ще на етапі проєктування.

Для дослідження процесу обтікання дугового крила потоком води, що набігає, було побудовано його 3D-модель. При її створенні було створено дві зони сітки у формі тетраедрів.

Перша сітка, яка формує простір моделювання, мала великий розмір комірок для скорочення часу розрахунку, тоді як простір ближче до моделі мав значно менший розмір комірок для підвищення точності розрахунку.

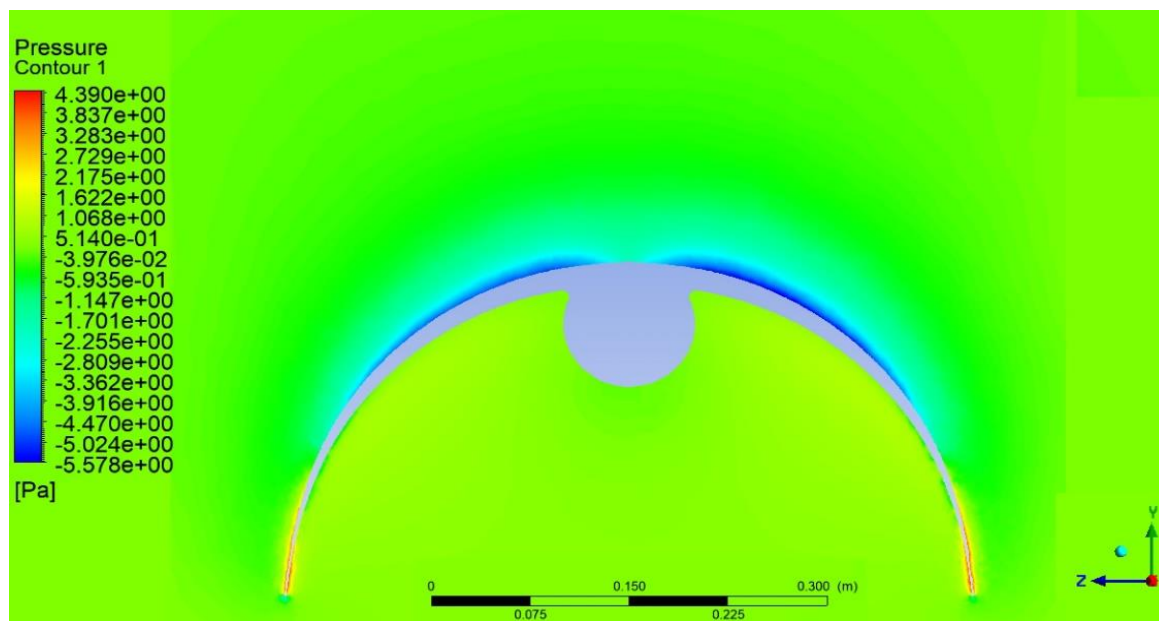
Загалом було створено 245 898 комірок. Для моделювання було обрано стандартну k -епсильонну модель турбулентності з увімкненим параметром теплопередачі, зі швидкістю потоку 3 м/с та турбулентністю 5%.

Середовищем моделювання була вода, і в розрахунку було використано 100 ітерацій.

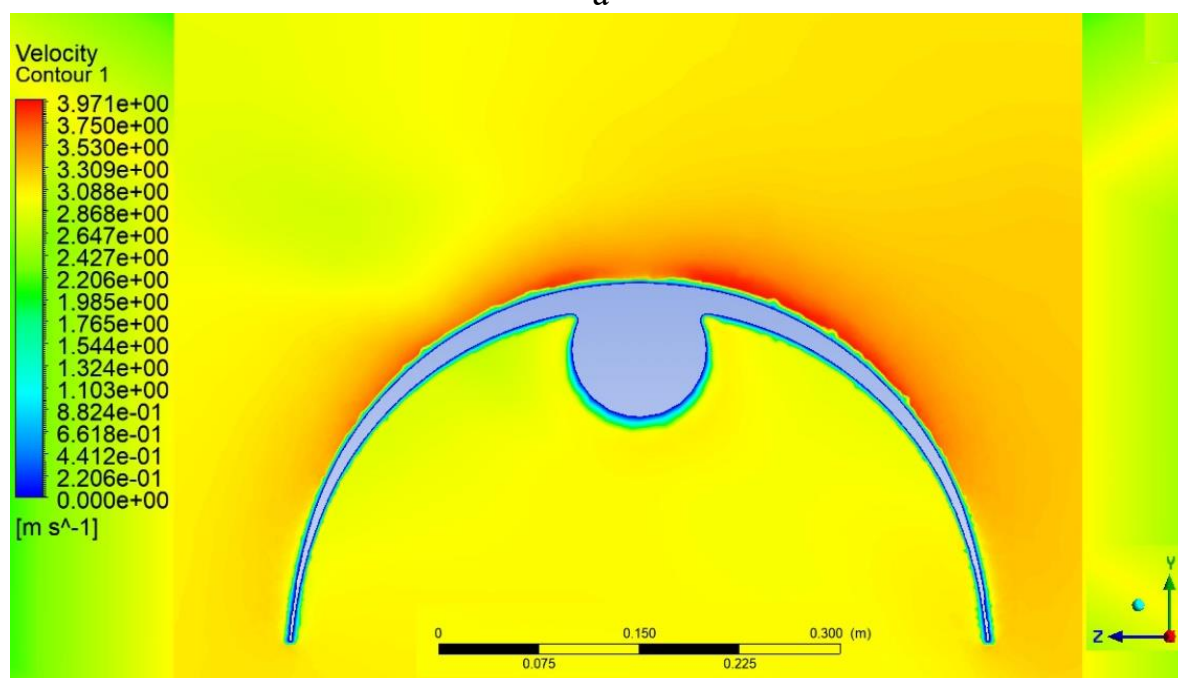
Гідродинамічне моделювання побудованої 3D-моделі було виконано в програмному середовищі ANSYS 2023 [82].

Результати моделювання наведено на рис. 4.6, де показано розподіл тиску та зміна швидкості по довжині дугового крила, геометричні та гідродинамічні характеристики якого описані вище.

Отримані у результаті CFD-моделювання результати можуть бути корисними при інженерному проєктуванні дугових крил буксированого радіобуя, наприклад, при розрахунках міцності, власне, самого крила, а також елементів його кріплення до корпусу радіобуя.



а



б

Рисунок 4.6 – Результати CFD-моделювання дугового крила буксированого радіобуя: а – розподіл тиску по довжині дугового крила; б – зміна швидкості потоку, що набігає, по довжині дугового крила

4.4 Виготовлення дугового крила за допомогою адитивних технологій

Відомо, що адитивні технології (від лат. *additio* — додавання) є однією з форм технологій адитивного (пошарового) виробництва деталей цих деталей, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу,

використовуючи раніше розроблені цифрові 3D-моделі [83]. На відміну від традиційних «субтрактивних» методів (фрезерування, точіння), де зайве відсікається, адитивне виробництво створює виріб «з нуля», мінімізуючи відходи.

Для друку використовують 3D-принтери, які створюють запроєктовані об'єкти шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі [84].

Вітчизняна наука на цей час має значний досвід застосування адитивних технологій в промисловості – в літакобудуванні та суднобудування і, зокрема, в морській робототехніці. Наприклад, в науково-дослідному інституті підводної техніки НУК за допомогою CAD-пакетів було успішно розроблено 3D-моделі основних складових буксируваного підводного апарата «Глайдер», які далі за допомогою 3D-принтера виготовлено і використано за призначенням [85, 86].

На рис. 4.7 наведено результати вказаної вище роботи.

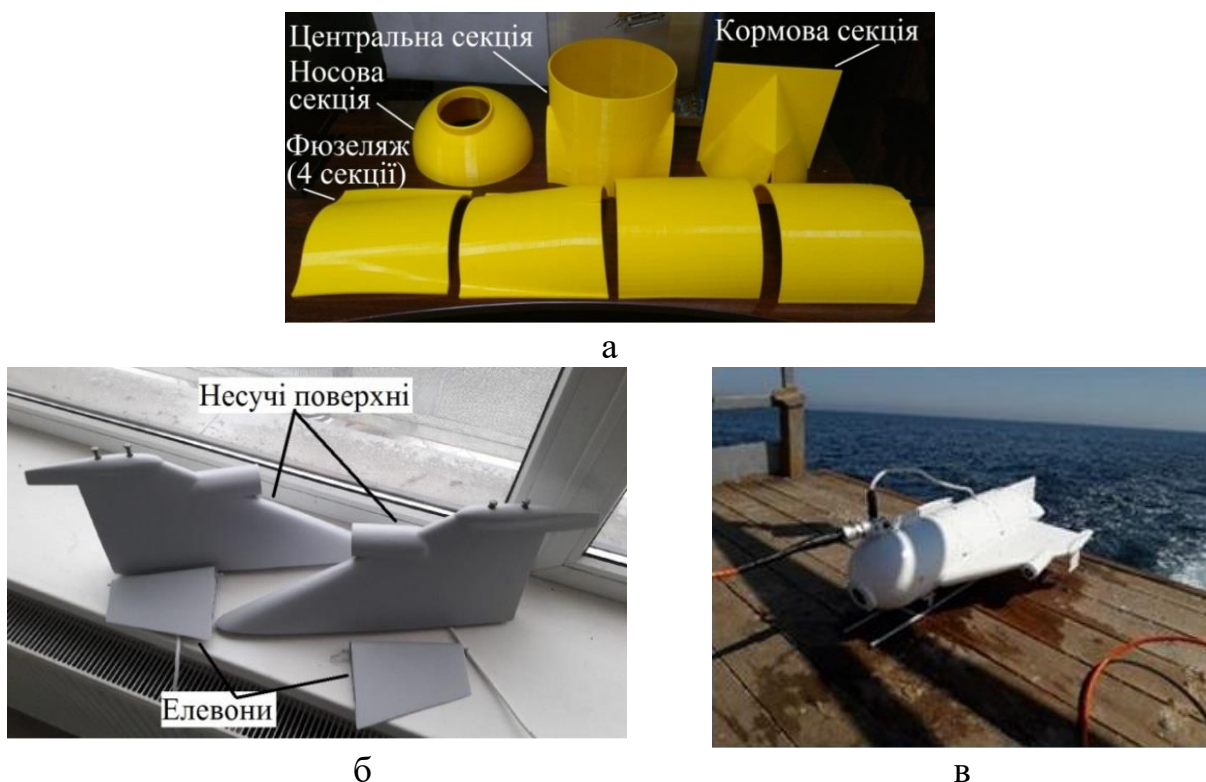


Рисунок 4.7 – Складові корпусу (а, б) буксируваного підводного апарата «Глайдер» та його морські натурні випробування (в)

Аналогічна технологія була використана у складі даного дисертаційного дослідження для виготовлення моделі дугового крила (дугової несучої поверхні) для буксированого РБ охоронного АНПА.

Модель крила має звуження за розмахом, при цьому, коренева хорда має довжину $b_{кор}=153$ мм, а кінцева хорда, відповідно, $b_{кін}=95$ мм.

Таким чином, середня аеродинамічна хорда крила становила $b_{сах} = (b_{кор} + b_{кін})/2 = 0,124$ м.

Модель дугового крила була вигнута по дузі радіусом 210 мм і охоплювала сектор у 75° . У якості матеріалу для виготовлення 3D-моделі дугового крила було використано пластмасу CoPET на основі зносостійкого сополієфіру (комбінація). Тобто PET поліетилентерефталат модифікований гліколем для поліпшення температурних і фізико-механічних властивостей несучої поверхні.

Виготовлені методом 3D-друку моделі показано на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 – Виготовлені методом 3D-друку моделі дугового крила буксированого РБ: а – права несуча поверхня; б – ліва несуча поверхня

До кореневої хорди крила була прилаштована прямокутна тонка шайба 55×182 мм з заокругленими кутами. При цьому, коренева хорда крила повернута відносно повздовжньої осі шайби на кут $\delta_{кор}=5,2^\circ$, що відповідає установочному куту крила на корпусі РБ (див. рис. 4.9).

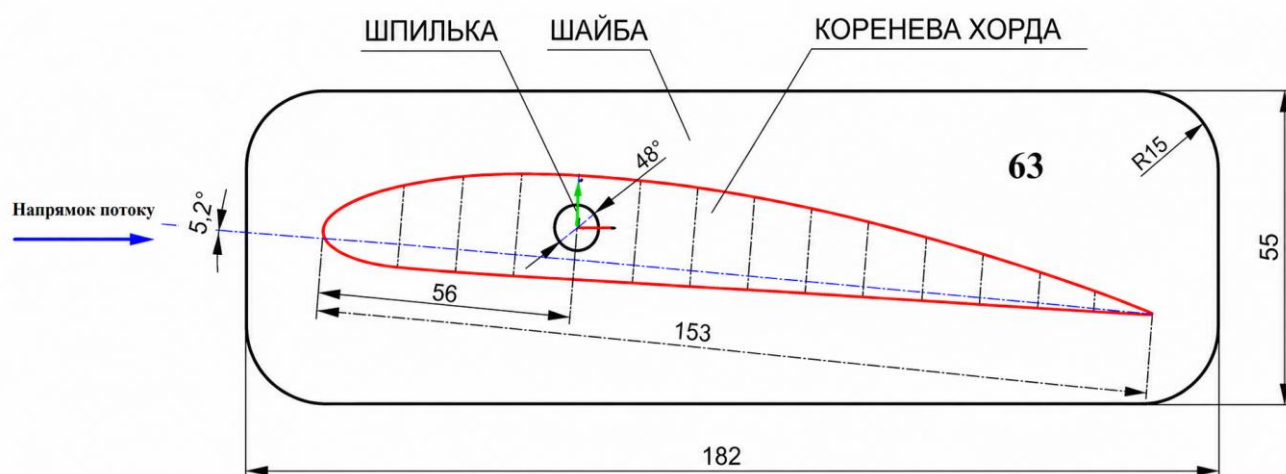


Рисунок 4.9 – Схема закріплення моделі дугового крила

Шайба, з одного боку, запобігала перетіканню рідини між нижньою і верхньою поверхнями крила, що також сприяє моделюванню кінематичних умов обтікання крила при наявності корпусу, а іншого – спрощувала визначення орієнтації крила в потоці (відносно довгої сторони шайби).

На відстані 45 мм від носика крила була встановлена різьбова шпилька М8, яка була елементом кріплення моделі крила до експериментальної установки та віссю повороту крила.

4.5 Підготовка до експерименту у гідродинамічній трубі моделі дугового крила буксированого радіобуя

Випробування моделі крила здійснювалося на спеціальній експериментальній установці, яка використовується на гідродинамічній трубі для дослідження гідродинамічних характеристик крил що коливаються (див. п. 2.5.4 дисертації).

Експериментальна установка складається з двох основних блоків: 2-х компонентної тензометричної платформи та електромеханічного привода, який забезпечує гармонійні кутові коливання вузла підвіски моделі крила.

Принципова схема експериментальної установки і схема її розміщення в робочій ділянці гідродинамічної труби під час проведення експерименту показані на рис. 4.10.

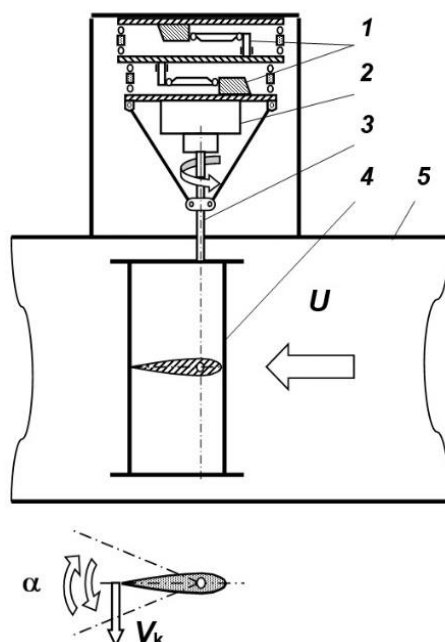


Рисунок 4.10 – Схема експериментальної установки і схема її розміщення в робочій ділянці гідродинамічної труби

Крило 4 приєднувалось в робочій ділянці 5 гідродинамічної труби до 2-х компонентного тензометричного динамометру 1. Обертання крила відносно осі 3 здійснювалося за допомогою спеціального електропривода 2.

Кінематична схема механізму (рис.4.11) призначена для перетворення обертального руху приводного валу електродвигуна в кутовий гойдальний рух осі крила. Вказана кінематична схема виконана у вигляді плоского чотириланкового механізму, у якого затиснений (зафіксований нерухомо) один зв'язок (кривошипно-кулісний механізм).

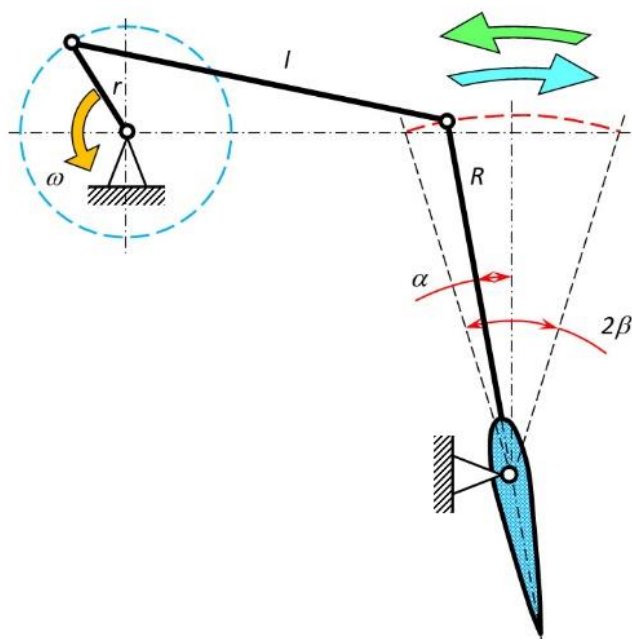


Рисунок 4.11 – Кінематична схема механізму кутових коливань крила

При роботі в коливальному режимі електромеханізм забезпечує перекладку крила таким чином, що кут повороту крила в часі змінюється за гармонійним законом $\alpha(t) = \beta \sin \omega t$, де ω – кругова частота коливань, β – амплітуда кутових коливань. Частота коливань крила f в експериментах може регулюватися в межах 0.2÷2.0 Гц.

В конструкції тензодинамометричної підвіски реалізований гостро направлений мінімум жорсткості у взаємно перпендикулярному напрямку, що забезпечує практично повну відсутність взаємного впливу компонент X і Y.

Похибка вимірювань гідродинамічних сил на цій експериментальній установці не перевищує 3%, а кута повороту - $\pm 0,25^\circ$ відповідно.

Калібрування 2-х компонентної тензометричної платформи та коливального блоку з датчиками реєстрації кута повороту здійснювалося безпосередньо перед проведенням випробувань на спеціальному стенді. Експериментальну установку на калібрувальному стенді показано на рис. 4.12.

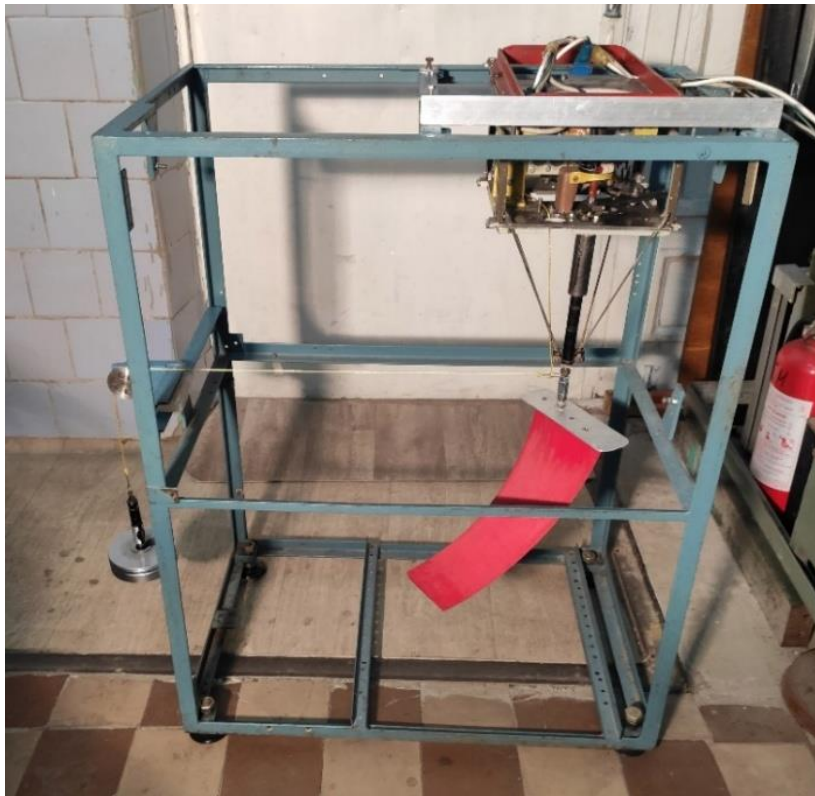


Рисунок 4.12 – Експериментальна установка в зборі (з встановленою моделлю крила) на калібрувальному стенді

У процесі експериментів гідродинамічні сили, що діють на модель крила (підймальна сила та сила опору) вимірювалися в швидкісній системі координат.

Швидкість потоку в гідродинамічній трубі вимірювалась за допомогою трубки Піто з диференційним датчиком тиску Motorola.

Реєстрація гідродинамічних сил, що діють на модель дугового крила, кута повороту та швидкості потоку, здійснювались за допомогою цифрового осцилографа.

Коефіцієнти гідродинамічних сил, що діють на модель крила, визначалися таким чином:

а) коефіцієнт сили опору

$$C_x = \frac{2 \cdot R_x}{\rho \cdot v^2 \cdot A_R},$$

де: R_x - зареєстрована сила опору дугового крила;

ρ - масова щільність води;

ν - швидкість потоку води в гідродинамічній трубі;

A_R – розгорнута площа крила в плані;

б) коефіцієнт підіймальної сили

$$C_y = \frac{2 \cdot P_y}{\rho \cdot \nu^2 \cdot A_R},$$

де: P_y - зареєстрована підіймальна сила;

Швидкість потоку води в гідродинамічній трубі під час проведення експериментів становила $\nu=1,55$ м/с, що при температурі води $t=14,8^\circ\text{C}$ склало число Рейнольдса, обчислене по середній аеродинамічній хорді:

$$Re=(\nu \cdot b_{cax} / \nu) = 1,65 \cdot 10^5.$$

Примітка: тут $\nu=1,162$ м²/с – коефіцієнт кінематичної в'язкості води.

В результаті серій дослідів було побудовано графічні залежності коефіцієнтів гідродинамічних сил, що виникають на моделі крила, від кута перекладки моделі крила.

4.6 Результати випробувань моделі дугового крила в гідродинамічній трубі

Після детальної перевірки та калібрування експериментальної установки були проведені випробування двох геометрично подібних моделей крила:

модель крила №1, що має шорстку поверхню, яка утворена у результаті роботи 3D-принтера за технологією пошарового нанесення робочого матеріалу (пластмаси); виміряна висота елементів шорсткості складала $\sim 0.1 \dots 0.2$ мм (рис. 4.13, а);



а



б

Рисунок 4.13 – Чистота поверхні моделі крила: а – після виготовлення на 3D-принтері; б – після покривання лаком і полірування

модель крила №2, яка після шліфування має технічно гладку поверхню (рис. 4.13, б).

В процесі випробувань коливальний механізм експериментальної установки був налаштований так, що забезпечував кут повороту моделі крила в діапазоні $\pm 15^\circ$.

Моделі крил кріпились на валу поворотного механізму таким чином, що забезпечувався кут атаки крила в потоці в діапазоні від $+0,5^\circ$ до $+30,5^\circ$ відносно лінії хорди крил.

В табл. 4.2 наведено результати випробувань моделі крила №1 в гідродинамічній трубі.

В таблиці також наведено величину аеродинамічної якості моделі крила №1 $K=C_y/C_x$.

Таблиця 4.2 - Результати випробувань моделі крила №1 в гідродинамічній трубі

Кут атаки, град	C_y	C_x	K
0,50	0,101	0,033	3,061
1,44	0,146	0,033	4,431
2,38	0,172	0,033	5,224
3,31	0,212	0,033	6,430
5,19	0,271	0,038	7,132
7,53	0,373	0,045	8,226
10,34	0,468	0,056	8,295
15,50	0,639	0,084	7,565
18,31	0,743	0,103	7,224
21,12	0,824	0,122	6,756
23,47	0,874	0,136	6,404
25,34	0,900	0,173	5,201
27,22	0,808	0,198	4,081
28,62	0,810	0,234	3,464
29,56	0,827	0,307	2,692
30,50	0,749	0,340	2,202

Експеримент проводився за наступними вхідними даними:

температура води в трубі – 20,0 °C;

коефіцієнт кінематичної в'язкості води – $1,00 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

швидкість потоку води – 1,51 м/с;

середня аеродинамічна хорда крила – 0,124 м;

розгорнута площа крила в плані – 0,0426 м²;

число Рейнольдса – $1,86 \cdot 10^5$.

В табл. 4.3 наведено результати випробувань моделі крила №2 в гідродинамічній трубі.

Таблиця 4.3 – Результати випробувань моделі крила №2 в гідродинамічній трубі

Кут атаки, град	C_y	C_x	K
0,50	0,090	0,032	2,80
1,44	0,135	0,032	4,21
2,38	0,163	0,032	5,08
3,31	0,196	0,032	6,13
5,19	0,256	0,032	7,99
7,53	0,357	0,038	9,51
10,34	0,459	0,050	9,24
15,50	0,630	0,074	8,48
18,31	0,745	0,095	7,86
21,12	0,837	0,114	7,31
23,47	0,906	0,134	6,76
25,34	0,964	0,151	6,39
27,22	1,011	0,183	5,52
28,62	1,008	0,230	4,38
29,56	0,962	0,242	3,98
30,50	0,967	0,264	3,66

В таблиці також наведено величину аеродинамічної якості моделі крила №2 $K=C_y/C_x$.

Експеримент проводився за наступними вхідними даними:

температура води в трубі – 21,0 °С;

коефіцієнт кінематичної в'язкості води – 0,986×E-06 м²/с;

швидкість потоку води – 1,47 м/с;

середня аеродинамічна хорда крила – 0,124 м;

розгорнута площа крила в плані – 0,0426 м²;

число Рейнольдса – 1,86·10⁵.

На рис. 4.14 і 4.15 наведено зведені графіки залежностей гідродинамічних характеристик моделей крила №1 і крила №2.

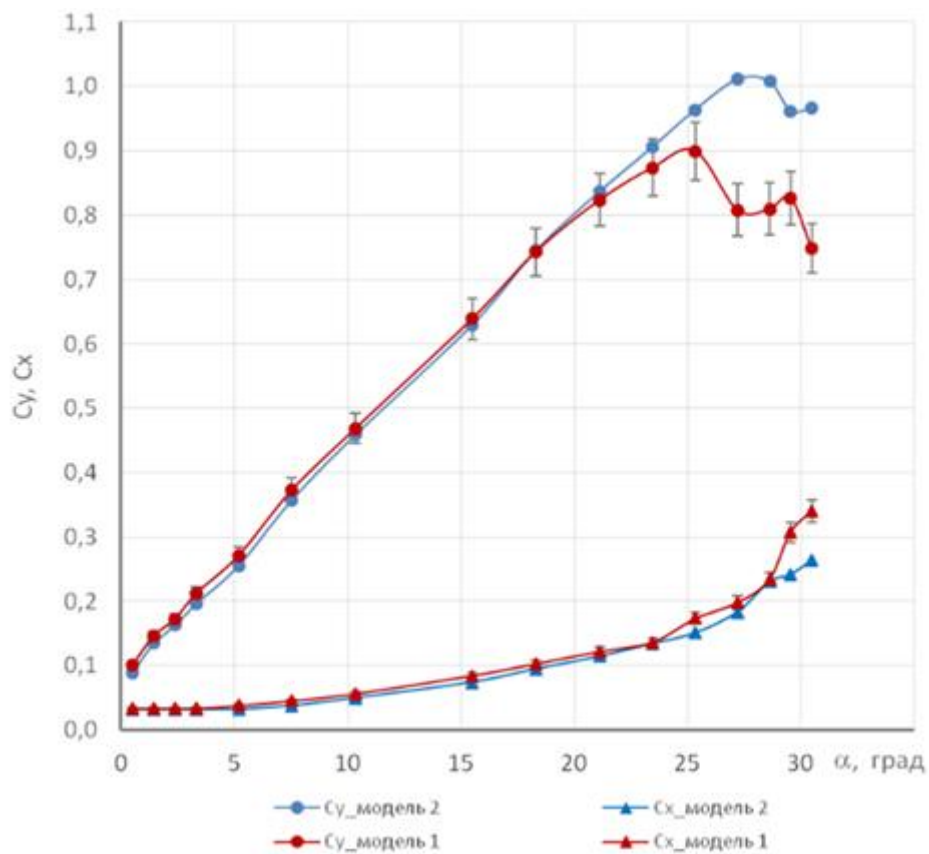


Рисунок 4.14 – Залежності гідродинамічних коефіцієнтів моделей крил

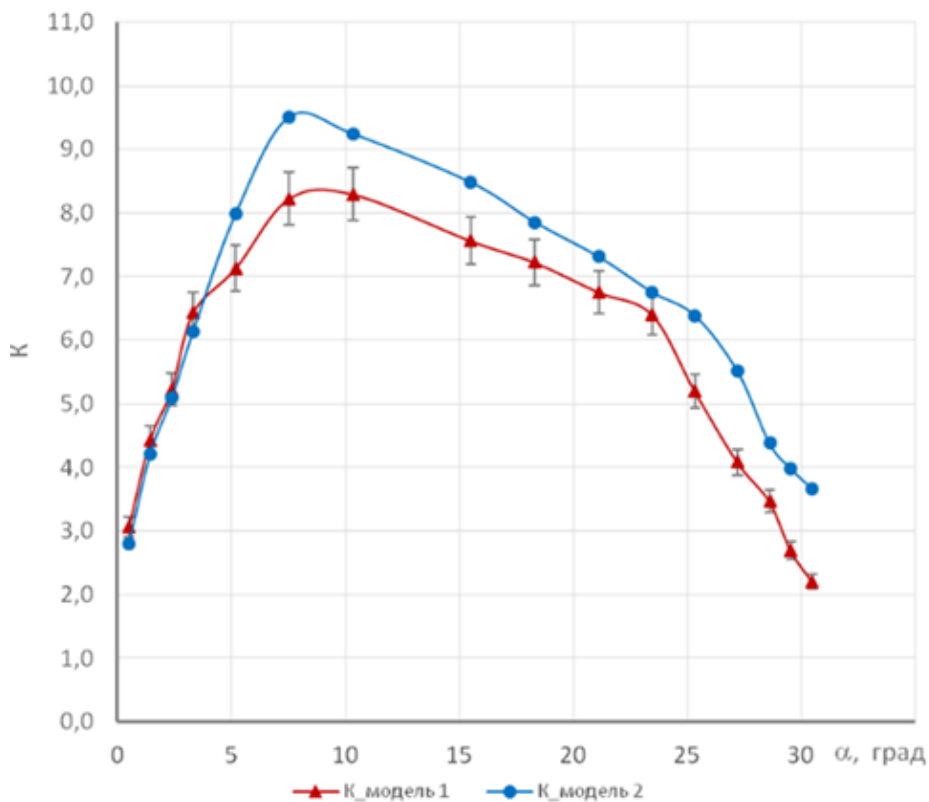


Рисунок 4.15 – Залежності гідродинамічної якості моделей крил

На графіках також нанесено вертикальні планки похибок на рівні 5% вимірених величин.

Результати випробувань моделі крила №1 в гідродинамічній трубі свідчать, що в діапазоні кутів атаки до 18° реалізується безвідривне обтікання і залежність коефіцієнта підйимальної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ має прямо пропорційний характер.

При цьому максимальний коефіцієнт підйимальної сили досягає величин 0,9.

Результати випробувань моделі крила №2 в гідродинамічній трубі свідчать, що прямо пропорційний характер залежності коефіцієнта підйимальної сили від кута атаки крила $C_y=f(\alpha)$ простягається до кутів атаки майже 25° , а максимальний коефіцієнт підйимальної сили досягає величин 1,0.

Коефіцієнт сили опору $C_x=f(\alpha)$ моделі крила №2 дещо менший, що привело до того, що гідродинамічна якість моделі крила №2 вища. Максимальна гідродинамічна якість $K=f(\alpha)$ досягається на кутах атаки близько 7° .

Отримані залежності утворюють наукове підґрунтя для інженерного проектування дугових крил для буксированого радіобуя охоронного АНПА.

Висновки до розділу 4

1. З метою встановлення попередніх напрацювань щодо застосування дугових несучих поверхонь у техніці було встановлено, що крила дугової (арочної) форми було успішно застосовано у літакобудуванні. Наприкінці 20-х років минулого сторіччя. Запропонована американським інженером В. Кастером конструкція дугового (канального) крила забезпечувала успішний зліт і посадку літаку, використовуючи коротку злітно-посадкову полосу.

Також виявлено рекламний варіант застосування дугового крила для підводного апарата. Проте, інженерна аргументація його застосування не наведена.

2. Встановлено особливості функціонування дугового крила у конструкції буксированого радіобуя. Зокрема, встановлено, що з переміщенням вздовж крила його підйомна сила поступово змінює свій напрям і на самому кінці крила діє горизонтально. Це призводить до вихроутворення на закінцівках крила та появи крутильних моментів, які негативно впливають на динаміку радіобуя.

3. Для зменшення впливу вихроутворення на траєкторію руху буксированого радіобуя та зменшення навантаження на закінцівки крила в його конструкцію було додано аеродинамічне кручення, яке реалізоване шляхом поступового зменшення кута атаки вздовж лінії (розмаху) крила. Крім того, профіль кінцевих частин крила зроблено симетричним, що виключає вихроутворення та дестабілізуючі моменти на кінцях крила.

4. Виконане CFD-моделювання дугового крила дало змогу оцінити розподіл тиску та зміну швидкості потоку, що набігає, по довжині цього крила, що може бути корисним при інженерному проектуванні таких елементів конструкції буксированого радіобуя.

5. Для подальших експериментальних досліджень дугового крила за допомогою 3D-принтера було виготовлено дві його фізичні моделі. У якості матеріалу було використано пластмасу CoPET на основі зносостійкого сополієфіру (комбінація). Моделі відрізнялись шорсткістю поверхні крила – перша модель мала шорсткість, утворену у результаті роботи 3D-принтера за технологією пошарового

нанесення робочого матеріалу (пластмаси), а друга модель мала технічно гладку поверхню.

6. Результати випробування моделей крила в гідродинамічній трубі підтвердили принципову працездатність дугового крила. Зокрема, отримано прямо пропорційну залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки дугового крила (для першої моделі – до 18° , для другої моделі – до 25° . При цьому максимальний коефіцієнт підйомної сили, відповідно, для першого і другого варіантів моделі крила, досягав величин 0,9 і 1,0. Максимальна гідродинамічна якість має місце на кутах атаки близько 7° .

7. Результати експериментальних досліджень обох фізичних моделей дугового крила буксированого радіобуя свідчать, що така конструкція несучої поверхні забезпечує досягнення двоєдиної задачі проєктування радіобуя АНПА охоронного призначення – по-перше, забезпечує компактне розташування радіобуя у ложементі АНПА при русі без радіозв'язку з береговим центром керування і, по-друге, забезпечує необхідну підйомну силу та стабільність руху буксированого радіобуя у приповерхневому шарі води для організації двостороннього радіозв'язку АНПА з береговим центром керування охоронною місією.

ВИСНОВКИ

У роботі вперше сформульовано та запропоновано структурований розв'язок прикладного науково-технічного завдання концептуального, зовнішнього та внутрішнього проєктування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируваним радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури (МКІ), розташованих на мілководних акваторіях.

При цьому отримано наступні результати.

1. На основі системного аналізу проблематики охорони об'єктів морської критичної інфраструктури, які розташовані на мілководних акваторіях, показано, що завдання їх охорони мають безперервний, просторово-розподілений характер і потребують застосування засобів морської робототехніки (ЗМР), здатних тривалий час працювати в автономному режимі в умовах складної гідрологічної та навігаційної обстановки.

2. На основі огляду та критичного аналізу сучасних ЗМР встановлено, що автономні ненаселені підводні апарати, самохідні прив'язні підводні апарати, буксирувані системи та малорозмірні безекіпажні надводні судна мають як суттєві переваги, так і принципові обмеження при застосуванні у задачах охорони об'єктів МКІ. Зокрема, виявлено внутрішню суперечність між вимогами до автономності підводних апаратів та необхідністю забезпечення надійного і оперативного зв'язку з береговими центрами керування в мілководних акваторіях.

3. Вперше на основі системного аналізу загроз об'єктам морської критичної інфраструктури, що розташовані на мілководних акваторіях, запропоновано концепцію двохланкової автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксируваний радіобуй з дуговими несучими поверхнями» для охорони цих об'єктів, що забезпечує стабільність двостороннього інформаційного обміну з береговим центром керування, зменшення енергетичних витрат та підвищення якості виконання охоронних місій.

4. Розроблено методологію дослідження АНПА-РБ, що ґрунтується на системному підході та поєднанні аналітичних, чисельних і експериментальних методів. Запропонована методологія створює наукове підґрунтя для удосконалення

проектування АНПА-РБ, призначених для охорони об'єктів МКІ. Показано, що на ранніх етапах розробки, коли АНПА-РБ знаходиться на етапах концептуального, зовнішнього і внутрішнього проектування, найбільш доцільними є теоретичні методи дослідження, а для вивчення гідродинамічних властивостей найменш вивчених його конструктивних елементів доцільним є їх доповнення експериментальними методами (гідродинамічна труба, дослідний басейн тощо)..

5. На основі застосування системного підходу удосконалено методологію концептуального та зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм шляхом формулювання чотирьох взаємопов'язаних підмножин завдань концептуального проектування, які містять конструктивно-компоновочні та гідродинамічні завдання, завдання оцінки економії енерговитрат рушійного комплексу такого апарата, інформаційно-комунікаційні та керуючі завдання і завдання ефективного застосування такого апарата, що утворює науково-методологічну основу зовнішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм та може бути використано для оцінки перспективності його створення та визначення технічних вимог для подальших етапів проектування.

6. Для оцінки ефективності конкретного типу морської роботи при його застосуванні у роботах з експлуатації інженерних споруд українського шельфу запропонована тривимірна матриця «Об'єкт МКІ – Охоронна робота на об'єкті МКІ – Ефективність охорони об'єкта МКІ», яка утворює науково-методичне підґрунтя для оцінки доцільності застосування даного засобу морської робототехніки у морській практиці.

7. На основі системного підходу удосконалено методологію внутрішнього проектування автономного ненаселеного підводного апарата з буксируванням радіобуєм шляхом формулювання генеральної множини основних завдань внутрішнього проектування та підмножини основних наукових задач для їх виконання, які ґрунтуються на чотирьох системних критеріях «Матерія», «Енергія», «Інформація» та «Корисна функція», що утворює науково-

методологічну основу внутрішнього проєктування такого виду підводної робототехніки.

8. Запропонована методологічна основа внутрішнього проєктування може бути використана для подальшої розробки типорозмірного ряду підводних апаратів із буксируваними радіобуями різного призначення — від науково-дослідних до оборонних і гуманітарних застосувань, зокрема для моніторингу та охорони критичної морської інфраструктури України.

9. Вперше отримано експериментальні залежності коефіцієнтів підйомної сили та опору для шорсткої та шліфованої дугових несучих поверхонь (крил) буксированого радіобуя при різних кутах атаки, які підтверджують їх ефективність як елемента конструкції автономної підводної системи типу «Автономний ненаселений підводний апарат – Буксирований радіобуй з дуговими несучими поверхнями». Результати випробувань моделі шорсткої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що в діапазоні кутів атаки до 18° реалізується безвідривне обтікання і залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y = f(\alpha)$ має прямо пропорційний характер. При цьому максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 0,9. Результати випробувань моделі шліфованої несучої поверхні в гідродинамічній трубі свідчать, що прямо пропорційний характер залежності коефіцієнта підйомної сили від кута атаки крила $C_y = f(\alpha)$ зберігається до кутів атаки майже 25° , а максимальний коефіцієнт підйомної сили досягає величин 1,0, що утворює теоретичну основу для проєктування такого засобу підводної робототехніки.

10. Результати роботи частково впроваджено у ТОВ «Джемонд Ботард» (Україна) при розробці концепції створення в Україні новітніх засобів морської робототехніки охоронного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України “Про критичну інфраструктуру”. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 5, ст.13). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
2. Christian Bueger, Tobias Liebetrau. Critical maritime infrastructure protection: What’s the trouble? Marine Policy, Volume 155, September 2023, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105772>
3. Andrew W Neal. After Nord Stream: four security dilemmas in critical maritime infrastructure protection. *International Affairs*, iiaf229. Published: 08 December 2025. <https://doi.org/10.1093/ia/iiaf229>
4. Emmanuel Garbolino, Jean-Pierre Chéry & Franck Guarnieri. The Systemic Approach: Concepts, Method and Tools. Safety Dynamics, 2018. Part of the book series: Advanced Sciences and Technologies for Security Applications ((ASTSA)). https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-96259-7_1
5. Blintsov V.S., Klochkov O.P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43-51.
6. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Кривцун, В.О. Нєкрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко; за ред. С.С. Рижкова. – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 340 с.
7. Blintsov V., Maidaniuk P., Sirivchuk A. Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. Number 3. P. 41-49. DOI: 10.21303 / 2461-4262.2019.00893.
8. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Сучасні задачі створення і застосування засобів морської робототехніки в інтересах України. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XIII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2022. – С. 108-110.
9. Leveraging Unmanned Surface Vessels to Enhance the Effectiveness of Port and Harbor Security. <https://www.worldports.org/leveraging-unmanned-surface-vessels-to->

[enhance-the-effectiveness-of-port-and-harbor-security/?utm_source=chatgpt.com](https://doi.org/10.3390/automation6020017)

10. Emerson Martins de Andrade, Joel Sena Sales, Jr. and Antonio Carlos Fernandes. Operative Unmanned Surface Vessels (USVs): A Review of Market-Ready Solutions. *Automation* 2025, 6(2), 17; <https://doi.org/10.3390/automation6020017>

11. Samuel Cohen-Salmon, Itzik Klein. Design and Experimental Validation of an Autonomous USV for Sensor Fusion-Based Navigation in GNSS-Denied Environments. [Submitted on 30 Mar 2025 to IEEE OCEANS 2025 Brest]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.23445>

12. Fundamentals of automatic control of a group of autonomous underwater vehicles : Monograph / ed. V. Blintsov. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. 192 p.

13. Dan Yu, Hongjian Wang, Xu Cao, Zhao Wang, Jingfei Ren and Kai Zhang. Enhancing Autonomous Underwater Vehicle Decision Making through Intelligent Task Planning and Behavior Tree Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(5), 791; <https://doi.org/10.3390/jmse12050791>

14. Блинцов В.С., Лонг Н.Т. Автоматизация управления движением однозвенной подводной буксируемой системы с подъемным буксируемым аппаратом // «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – Харьков – №6/2 (18). – 2005. – С. 11-14.

15. Проектування засобів морської робототехніки на основі системного підходу : монографія : у 3 ч. / за ред. д-ра техн. наук, проф. В. С. Блінцова. — Миколаїв : Іліон, 2023. Ч. 1 : Самохідні прив'язні підводні системи / В. С. Блінцов, О. П. Ключков, В. А. Надточій, А. В. Надточий. — 2023. — 164 с.

16. Блінцов В.С., Данько Є.С. Сучасний стан та задачі створення автономного ненаселеного підводного апарата транспортного типу. *Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference «Science and society: tools of modern innovative development»*. Bilbao, Spain, May 06 – 09, 2025. С. 294-296.

17. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Роботизовані технології охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд»,

15-16 травня 2024 року. Миколаїв : Іліон, 2024. С. 126-131

18. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Фомбо Ж. Особливості конструкції та керування комплексом «автономний ненаселений підводний апарат з самохідним прив'язним радіобуєм». Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі». (28–29 листопада 2024 р.). Херсон, Херсонська державна морська академія, 2024. – С. 15-17.

19. Блінцов В.С., Сірівчук А.С., Надточій А.В., Надточій В.А. Автоматизація керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм. Наукова монографія. – Херсон : Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, 2022. – 196 с.

20. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Трибулькевич В.В. Проектні задачі створення засобів морської робототехніки для охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури. Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. С. 79-91. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091

21. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Тарчук А.А. Основні задачі створення дволанкової автономної підводної системи. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 961-963.

22. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H. (2006). Engineering Design: A Systematic Approach. Third Edition. Springer, 2006. <https://www.amazon.co.uk/Engineering-Design-Systematic-Approach-Pahl/dp/1846283183>

23. Volodymyr Blintsov, Olexandr Klochkov. Generalized Method of Designing Unmanned Remotely Operated Complexes Based on the System Approach – «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. – Number 2. – 43-51 pp. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00878>

24. Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: A survey Autonomous Robots. Published: January 2000. Volume 8, pages 7–24, (2000). <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008984701078>

25. Mohd Shahrieel, Mohd Shahrieel Mohd Aras, Khor Li, Khairi Aripin, Khairi Aripin. (2019). Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD. – Indian Journal of Geo-Marine Sciences. July 2019 48(7):1081-1090. https://www.researchgate.net/publication/334479028_Design_analysis_and_modelling_of_autonomous_underwater_vehicle_AUV_using_CAD
26. V. Blintsov, H. Hrudinina. Mathematical modeling of autonomous underwater vehicle propulsion and steering complex operation in oblique (beveled) water flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. 4/9 (100), pp. 10-28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176673>
27. Zhao Y., Hu Z., Du W., Geng L., Yang Y. (2024). *Research on Modeling Method of Autonomous Underwater Vehicle Based on a Physics-Informed Neural Network*. 2024, 12(5), 801. <https://doi.org/10.3390/jmse12050801>
28. João Victor Nunes de Sousa, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Francisco Alves Batista, Edna Cordeiro de Souza, Daniel César de Macedo Cavalcante, Paulo de Moraes Pessoa, João Evangelista Franco do Carmo. (2020). On the Study of Autonomous Underwater Vehicles by Computational Fluid-Dynamics. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2020, 10, Pages 63-81. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2020.101005>
29. Lin Hong, Xin Wang, De-Sheng Zhang. (2024). CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey. *Ocean Engineering*, Volume 305, 1 August 2024, Page 117911. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117911>
30. Проектування засобів морської робототехніки на основі системного підходу : монографія : у 3 ч. / за ред. д-ра техн. наук, проф. В. С. Блінцова. — Миколаїв : Іліон, 2023. Ч. 1 : Самохідні прив'язні підводні системи / В. С. Блінцов, О. П. Клочков, В. А. Надточій, А. В. Надточий. — 2023. — 164 с.
31. Клочков О.П. Проектні задачі енергоживлення одноланкових самохідних прив'язних підводних систем. «*Shipbuilding and Marine Infrastructure*». 2019. №. 1 (11). Р. 96-104. DOI [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).11](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).11)
32. Leighton Hart-Kenned, Experimental Determination of an AUV's Drag Resistance in a Towing Tank. BACHELOR OF SCIENCE IN MECHANICAL AND

OCEAN ENGINEERING at the MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
May 2024. https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/156583?utm_source=chatgpt.com

33. João Lucas Dozzi Dantas, Fábio Villas Boa. EXPERIMENTAL RESEARCH ON AUV MANOEUVRABILITY. Proceedings of 21st International Congress of Mechanical Engineering October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil. https://abcm.org.br/anais/cobem/2011/PDF/007102.pdf?utm_source=chatgpt.com

34. United States Naval Academy. Hydromechanics Laboratory. https://www.usna.edu/Hydromechanics/Facilities/index.php?utm_source=chatgpt.com

35. National Research Council Canada. Towing tank research facility https://nrc.canada.ca/en/research-development/nrc-facilities/towing-tank-research-facility?utm_source=chatgpt.com

36. Опытный бассейн. Институт гидромеханики, 1990. <https://global.museum-digital.org/object/3299812>

37. Дослідний басейн. <https://shipdesignchair.odessa.ua/uk/laboratoriya-ua/doslidnyy-baseyn>

38. Каталог наукової продукції національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Рекламно-інформаційне видання. Миколаїв, НУК, 2022. 97 с.

39. Регістр завершив акредитацію унікальної в Україні лабораторії Інституту гідромеханіки Національної академії наук України. <https://shipregister.ua/register-zavershiv-akreditaciyu-unikalnoyi-v-ukrayini-laboratoriyi-institutu-gidromexaniki-nacionalnoyi-akademiyi-nauk-ukrayini/>

40. Emerson Cavitation Tunnel. https://en.wikipedia.org/wiki/Emerson_Cavitation_Tunnel?utm_source=chatgpt.com

41. Garfield Thomas Water Tunnel. https://en.wikipedia.org/wiki/Garfield_Thomas_Water_Tunnel

42. Каян В.П., Пятецкий В.Е. Биогидродинамическая установка замкнутого типа для исследования гидродинамики плавания морских животных. «Бионика». Республиканский межведомственный сборник. Академия наук Украинской ССР, 1971. – С. 121-124.

43. Nekrasov V. Conceptual Designing of Ships: monograph / Valeriy Nekrasov. – Kyiv-Kherson: Oldy-Plus, 2019. – 112 p. (in English).

44. Weicheng Cui, Shixiao Fu, Zhiqiang Hu. Encyclopedia of Ocean Engineering. Springer Nature Singapore, April 2022. <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-981-10-6946-8>

45. Алоба Л.Т., Бабкін Г.В., Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С., Трибулькевич В.В. (2019). Теоретичні основи проєктування морської робототехніки. / Алоба Л.Т., Бабкін Г.В., Войтасик А.М., Клочков О.П., Сірівчук А.С., Трибулькевич В.В. // Під редакцією д.т.н., проф. В.С. Блінцова – Миколаїв: НУК. – 83 с.

46. Порівняльний аналіз освоєння континентального шельфу чорного і азовського морів державами регіону: здобуття досвіду і перспективи співпраці для України. <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2012-08/analiz-f1021.pdf>

47. Запаси газу на шельфі Чорного і Азовського морів оцінили в 50 мільярдів кубів. <https://www.epravda.com.ua/news/2017/10/31/630674/>

48. Volodymyr Blintsov, Pavlo Maidaniuk, Andrii Sirivchuk. Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. Number 3. Pages 41-49. DOI: 10.21303 / 2461-4262.2019.00893

49. V. Blintsov, P. Maidaniuk. Classification on Projects for the Protection of Marine critical Infrastructure Facilities. Proceedins of Odessa Polytechnic University, 2019. 3(59). Pages. 80-89. DOI:[10.15276/opu.3.59.2019.11](https://doi.org/10.15276/opu.3.59.2019.11)

50. The UK National Strategy for Maritime Security. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/322813/20140623-40221_national-maritime-strat-Cm_8829_accessible.pdf

50. Maritime Security Transit Corridor (MSTC). URL: <https://combinedmaritimeforces.com/maritime-security-transit-corridor-mstc/>

51. Maritime critical infrastructure protection (MCIP) in a changing security environment. <https://www.marseccoe.org/wp-content/uploads/2023/10/Maritime-Critical-Infrastructure-Protection-.pdf>

52. 2023 - REPORT - PROTECTING CRITICAL MARITIME INFRASTRUCTURE – THE ROLE OF TECHNOLOGY. Njall Trausti FRIDBERTSSON (Iceland) - GENERAL REPORT. <https://www.nato-pa.int/document/2023-critical-maritime-infrastructure-report-fridbertsson-032-stc>

53. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Огляд та аналіз засобів підводної робототехніки для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XVI Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2025. – С. 52-55.

54. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. (2024). Robotic monitoring of facility security maritime critical infrastructure. Proceedings of the EMCEI (Scopus). 15-18 may, 2024. Marrakesh, Morocco. 5 pages.

55. Reger E. Race, Jacob Piskura, David S. Sanford. Towed Antenna System and Method. United States Patent US 8,813,669 B2, Aug. 26, 2014. <https://patentimages.storage.googleapis.com/86/5b/33/82d78b3280d109/US8813669.pdf>

56. RADIO BUOY. https://www.idrobotica.com/accessories/radiobuoy?utm_source=chatgpt.com

57. Blintsov, V. S., Tarchuk, A. A., & Trybulkevych, V. V. (2024). Design tasks for the creation of marine robotic systems for protection and defense of marine critical infrastructure facilities. Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy, 1(28), 79–91. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091>

58. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Костенко Д.В., Мороз В.В., Коробов В.І., Тарчук А.А. Проблеми проєктування і застосування засобів морської робототехніки з буєм зв'язку. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проєктування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» , 22-23 травня 2025 року. Миколаїв : Іліон, 2025. С. 22-27.

59. Blintsov, V. S., & Kutsenko, P. S. (2020). Application of the system approach during external design of unmanned towed underwater systems. Mechanics of Gyroscopic Systems, (39), 105–132. <https://doi.org/10.20535/0203-377110>

60. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання зовнішнього проєктування підводного робота для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №3, 2025. С. 21-30. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).4](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).4)

61. Рижков С.С., Блінцов В.С., Квасницький В.Ф., Кошкін К.В., Романчук М.П., Шамрай О.М., Жуков Ю.Д., Ілюшенко В.М., Єгоров Г.В., Севрюков В.В. Інноваційні технології побудови суден і засобів океанотехніки // Монографія. Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2009. – 355 с

62. Blintsov, V. S., Nadtochy, A. V. (2024). Humanitarian demining of shallow-water areas: Technologies and robotic support. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 1(18), 4–10. [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01)

63. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання внутрішнього проєктування підводного апарата з радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №4, 2025. С. 3-12. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).1](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).1). (Видання категорії Б).

64. Блінцов В.С., Клочков О.П. Рівняння існування самохідної прив'язної підводної системи як оцінка можливості її створення. *Міжнародний науково-виробничий журнал «Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія»*. 2016. № 3. С. 25-30. <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/12/201603.pdf>

65. Jing Yan, Xian Yang, Haiyan Zhao, Xiaoyuan Luo, Xinping Guan. *Autonomous Underwater Vehicles. Localization, Tracking, and Formation*. Springer, Singapour, 2021. 222 pages. DOI:10.1007/978-981-16-6096-2

66. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. The task of creating marine robotics for the operation of engineering structures on the Ukrainian shelf. In book: *Recent Research on Sedimentology, Stratigraphy, Paleontology, Tectonics, Geochemistry, Volcanology and Petroleum Geology. Proceedings of the 3rd MedGU, Istanbul 2023 (Volume 2)*. Publisher : Springer Nature, pp.215-219). <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-26140638-1095b34377.pdf>
<https://www.researchgate.net/publication/397079534>

67. Volodymyr S. Blintsov, Andrii A. Tarchuk. EXTERNAL DESIGN TASKS OF AN UNDERWATER ROBOT INTENDED FOR THE PROTECTION OF MARINE CRITICAL INFRASTRUCTURE IN SHALLOW-WATER MARITIME AREAS. Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 2025. №3 (501). Pages 21-30. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).4](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).4)
68. Radosław Kiciński, Bogdan Szturomski, Andrzej Żak, Ryszard Studański. Designing an underwater towed vehicle using numerical methods. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(10), 359–370 <https://doi.org/10.12913/22998624/207941>
69. Egidio D’Amato, Immacolata Notaro, Vincenzo Piscopo, Antonio Scamardella. Design of Fixed Hydrofoils for Planing Craft. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, 11(2), 246; <https://doi.org/10.3390/jmse11020246>
70. H. Wang, C.J. Teo, B.C. Khoo, C.J. Goh. Computational Aerodynamics and Flight Stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft. *Procedia Engineering*, Volume 67, 2013, Pages 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.002>
71. Hydrodynamic Design of Ships. Editor Gregory Grigoropoulos. Editorial Office MDPI AG Grosspeteranlage 5 4052 Basel, Switzerland. 214 pages. doi.org/10.3390/books978-3-7258-1606-4
72. Christopher J. von Klemperer, Roy Horwitz, A. G. Malan. An articulating wingsail design for Wind Assisted Ship Propulsion (WASP) applications. May 2023. *Scientific African*, 20 (1880):e01699. DOI:[10.1016/j.sciaf.2023.e01699](https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01699)
73. Neha Sunil Patil, Awanish Chandra Dubey, and Anantha Subramanian. Fin based active control for shiproll motionstabilization. *MATEC Web of Conferences*, Volume 272 (2019). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201927201026>
74. Robert Guttman. (2018). Why Willard Custer’s Unique Channel Wing Never Took off. <https://www.historynet.com/custers-channel-wing/>
75. An Experimental Study on the Efficacy of the Custer Channel Wing. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2025-106787>
76. K4 MANTA. <https://www.krakentechnology.com/k4manta>

77. Slizhevskii NB, Korol YuM, Sokolik MG. Gidrodinamicheskii raschet samokhodnikov podvodnikov apparatov: Uchebnoe posobie. – Nikolaev : USMTU. 2000.

78. Volodymyr S. Blintsov, Heorhii V. Babkin, Dmytro V. Kostenko, Volodymyr Moroz, Vitalii Korobov, Andrii Tarchuk. Design and Application of Marine Robotics with a Communication Buoy. POLISH MARITIME RESEARCH 4 (128) 2025 Vol. 32; pp. 142-149. DOI:[10.2478/pomr-2025-0057](https://doi.org/10.2478/pomr-2025-0057)

79. Prandtl, L., & Tietjens, O. G. (1934). Applied Hydro- and Aeromechanics. Copyright by United Engeniiring Trustess. Inc., 1934. – 354 Pages. <https://ia601407.us.archive.org/3/items/in.ernet.dli.2015.205400/2015.205400.Applied-Hydro.pdf>

80. Kashafutdinov ST, Lushin VN. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik krilovikh profilei. – Siberian Scientific Research Institute of Aviation named after S.A. Chaplygin. 1994.

81. Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. An Introduction. Springer Berlin Heidelberg, 1995. 287 Pages. <https://soaneemrana.com/onewebmedia/COMPUTATIONAL%20FLUID%20DYNAMICS%20BY%20JHON%20D%20ANDERSON%20JR..pdf>

82. Luyanda M. Meyers, Velaphi Msomi. (2021). Hydrodynamic analysis of an underwater glider wing using ANSYS fluent as an investigation tool. Materials Today: Proceedings. Volume 45, Part 6, 2021, Pages 5456-5461 DOI:[10.1016/j.matpr.2021.02.127](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.127)

83. Адитивні технології. https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97

84. Ali Alicioğlu, M. Erden Yıldızdağ. (2022). Additive Manufacturing Techniques and Their Potential in the Shipbuilding Industry. Journal of Ship and Marine Technology. VOLUME: 2022 ISSUE: 221. P: 178 – 199. January 2022. DOI: [10.54926/gdt.1119936](https://doi.org/10.54926/gdt.1119936)

85. Блінцов В.С., Куценко П.С. Генезис технологій та шляхи удосконалення проєктування та побудови буксированих підводних систем для мілководних акваторій /В. С. Блінцов, П. С. Куценко // Технологічний аудит та резерви виробництва, 2020, – №3. – С. 19-27. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202109

86. Куценко П.С. Удосконалення проєктування ненаселених буксированих підводних систем для оперативного обстеження мілководних захищених акваторій. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 – конструювання та будування суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021.

ДОДАТКИ

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи



GEMOND Boat

sailing and motor boats



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ДЖЕМОНД БОТЯРД",
м. Дніпропетровськ, 49000, о-в Файнберга, б. 9,
р/р 26006050247843 у ПАТ КБ «Приватбанк», МФО 305299,
ОКПО 38925049, ІПН 389250404612, податкове свідоцтво № 200149796
т./ф. 056 3706288 mail@gemond.com www.gemond.com

ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Цим документом засвідчуємо, що результати науково-дослідної роботи «Удосконалення проектування автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури» (науковий керівник – професор Блінцов В.С., відповідальний виконавець – аспірант Тарчук А.А.), виконаної у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова у рамках договору про творчу співпрацю з Товариством з обмеженою відповідальністю «Джемонд Ботярд», впроваджені в ТОВ «Джемонд Ботярд» при розробці концепції створення в Україні новітніх засобів морської робототехніки охоронного призначення.

Ефективність впровадження науково-дослідної роботи:

а) науково-технічні переваги роботи полягають у системному підході до проблеми проектування засобів морської робототехніки охоронного призначення, а також у розробці засобів морської робототехніки з покращеними експлуатаційними характеристиками;

б) соціально-економічні переваги роботи полягають у створенні наукового підґрунтя для побудови пошукових підводних апаратів-роботів з покращеними експлуатаційними характеристиками, а також у створенні конкурентоспроможної продукції морської робототехніки для експорту до країн, що потребують ефективних рішень для захисту своїх об'єктів морської інфраструктури;

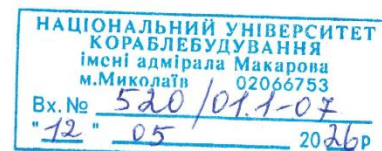
в) економічний ефект не розраховувався.

Перспективи розширення впровадження полягають у створенні серійних зразків морської робототехніки охоронного призначення, зокрема, для виконання завдань гуманітарного розмінування мілководних акваторій України, а також у започаткуванні освітніх і наукових програм з підготовки інженерів і науковців нової генерації в закладах вищої освіти, участі у міжнародних наукових програмах та спільних проєктах за напрямком «Морська робототехніка».

Директор
ТОВ «Джемонд Ботярд»



Андрій КОВАЛЕВСЬКИЙ



Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Трибулькевич В.В. Проектні задачі створення засобів морської робототехніки для охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури. Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 1 (28), 2024. С. 79-91. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091 (Видання категорії Б)

2. Volodymyr S. Blintsov, Heorhii V. Babkin, Dmytro V. Kostenko, Volodymyr Moroz, Vitalii Korobov, Andrii Tarchuk. Design and Application of Marine Robotics with a Communication Buoy. POLISH MARITIME RESEARCH 4 (128) 2025 Vol. 32; pp. 142-149. DOI:[10.2478/pomr-2025-0057](https://doi.org/10.2478/pomr-2025-0057) (Scopus)

3. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання зовнішнього проектування підводного робота для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №3, 2025. С. 21-30. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).4](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).4) (Видання категорії Б).

4. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Завдання внутрішнього проектування підводного апарата з радіобуєм для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури на мілководних морських акваторіях. Збірник наукових праць НУК, №4, 2025. С. 3-12. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).1](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).1). (Видання категорії Б).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Блінцов В.С., Тарчук А.А.(2022). Сучасні задачі створення і застосування засобів морської робототехніки в інтересах України. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XIII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2022. – С. 108-110.

2. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. (2023). The task of creating marine robotics for the operation of engineering structures on the Ukrainian shelf. In book: Recent Research on Sedimentology, Stratigraphy, Paleontology,

Tectonics, Geochemistry, Volcanology and Petroleum Geology. Publisher : Springer Nature, pp.215-219).

https://www.researchgate.net/publication/397079534_The_Task_of_Creating_Marine_Robotics_for_the_Operation_of_Engineering_Structures_on_the_Ukrainian_Shelf.

<https://www.researchgate.net/publication/397079534>

3. Volodymyr Blintsov, Andriy Tarchuk, Viktoriia Trybulkevich. (2024). Robotic monitoring of facility security maritime critical infrastructure. Proceedings of the EMCEI (Scopus). 15-18 may, 2024. Marrakesh, Morocco. 5 pages.

4. Блінцов В.С., Тарчук А.А. (2024). Роботизовані технології охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд», 15-16 травня 2024 року. Миколаїв : Іліон, 2024. С. 126-131.

5. Блінцов В.С., Тарчук А.А., Фомбо Ж. Особливості конструкції та керування комплексом «автономний ненаселений підводний апарат з самохідним прив'язним радіобуєм». – Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI – 2024). Херсон, 28–29 листопада 2024.

6. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Тарчук А.А. Основні задачі створення дволанкової автономної підводної системи. – Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 961-963.

7. Блінцов В.С., Бабкін Г.В., Костенко Д.В., Мороз В.В., Коробов В.І., Тарчук А.А. Проблеми проектування і застосування засобів морської робототехніки з буєм зв'язку. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» , 22-23 травня 2025 року. Миколаїв : Іліон, 2025. С. 22-27

8. Блінцов В.С., Тарчук А.А. Огляд та аналіз засобів підводної робототехніки для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури. – Інновації в

суднобудуванні та океанотехніці : XVI Міжнародна науково-технічна конференція
: матеріали. – Миколаїв : НУК, 2025. – С. 52-55.