

УДК 629.584

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/07>**Казмиренко Ю.О.**<https://orcid.org/0000-0002-7120-8226>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Грудініна Г.С.**<https://orcid.org/0000-0001-8298-9251>

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ КОРПУСІВ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ

*Проектування підводних конструкцій, зокрема автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) з буксированим радіобуєм, пов'язане зі складною взаємодією гідродинамічних, механічних і керуючих процесів, що відбуваються в умовах змінного зовнішнього середовища. Експериментальні дослідження таких систем є вартісними, тривалими та обмеженими за варіативністю умов, що зумовлює необхідність застосування сучасних засобів програмного моделювання на етапах проектування та оптимізації. Використання чисельних методів дозволяє дослідити вплив форми корпусу АНПА, параметрів несучих поверхонь, характеристик рушійно-керуючого комплексу, а також динаміки кабелю та буксированого буйа на загальну стійкість і керованість системи.*

*Особливістю системи «АНПА – кабель – радіобуй» є наявність додаткових нелінійних збурень, спричинених хвильовими процесами, течіями та змінним натягом кабелю, що суттєво ускладнює аналітичний опис і вимагає застосування багатозмінних моделей. У цьому контексті доцільним є використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як AUV SIM компанії Dynautics Ltd, яке забезпечує моделювання руху підводних апаратів у реалістичних умовах експлуатації. Даний програмний продукт дозволяє враховувати гідродинамічні сили та моменти, параметри навколишнього середовища, а також реалізовувати алгоритми автоматичного керування.*

*Застосування AUV SIM на етапі проектування дає змогу зменшити кількість натурних експериментів, підвищити точність оцінки експлуатаційних характеристик і здійснити оптимізацію конструктивних параметрів системи ще до її фізичної реалізації. Таким чином, програмне моделювання є ключовим інструментом підвищення ефективності розробки АНПА з буксированим радіобуєм та забезпечення їх надійної роботи в складних гідрометеорологічних умовах.*

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, автономний підводний апарат, буксирований буй, гідродинамічна характеристика.

**Постановка проблеми.** Визначення сучасних засобів комп'ютерного проектування для створення типорозмірного ряду підводних апаратів з буксированими радіобуями різного цільового призначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) малого та середнього класу нині активно розвиваються та застосовуються у широкому спектрі задач – від океанографічних і гідрографічних досліджень до екологічного моніторингу, пошуково-рятувальних місій і оборонних операцій.

У статті [1] автори пропонують доповнити поточні дослідження траєкторії руху прив'язаного

підводного апарату за різних швидкостей буксирування. Гідродинамічна модель складається з буксировачного троса, гвинтів з канальними гвинтами та гідрокрил. Для дослідження троса використовується метод скінченних сегментів, який використовує кілька циліндрів, з'єднаних кульовим шарніром. Траєкторія та гідродинамічні характеристики прив'язаного підводного апарату значно змінюються, коли швидкість буксирування змінюється з низької на високу.

В роботі [2] описано недороге та зручне в налаштуванні рішення для керування довжиною нейтрально плавучого троса за допомогою збалансованої системи буй-баласт, реалізованої на частині

троса проксимально до ROV. У систему вбудований датчик кривизни, який допомагає керувати живильником кабелю на поверхні. Це є корисним рішенням для згладжування рухів троса та пом'якшення зовнішніх збурень.

У статті [3] представлено нову систему моделювання для оцінки керування рухом у прив'язаних багатороботних системах у динамічних морських середовищах. Зокрема, вона зосереджена на скординованій роботі автономного підводного апарату (AUV) та автономного надводного апарату (ASV). Система використовує GazeboSim, вдосконалений реалістичними плагінами морського середовища та режим ArduPilots SoftwareIn-The-Loop (SITL), для забезпечення високоточної платформи моделювання.

Розуміння взаємодії між поверхневими хвилями та плавучими, закріпленими конструкціями є важливою проблемою для проектування морських споруд [4]. Традиційно для вивчення цих проблем використовувався експериментальний аналіз, але використання обчислювального моделювання потенційно може зменшити кількість необхідних експериментальних ітерацій. В роботі обговорюється закріплений сферичний буй, що коливається як через, так і впоперек вільної поверхні, а також взаємодіє з падаючим синусоїдальним хвильовим ланцюгом.

У дослідженні [5] пропонується новий мобільний буй, здатний здійснювати вертикальний профільюючий рух, подібний до профільюючих буїв Argo, та пілкоподібний ковзний рух, подібний до підводних планерів. Запропонований мобільний буй може перемикатися між двома режимами руху за допомогою керування крил.

Авторами роботи [6] було спроектовано, побудовано та випробувано в польових умовах інструментальну платформу на основі буя («О-буй») для цілорічного вимірювання озону над арктичним морським льодом. О-буй працював автономно, щодня здійснюючи двонаправлену передачу даних за допомогою супутникового зв'язку Iridium.

У роботі [7] представлено нелінійну динамічну модель та контролер руху системи, що складається з безпілотного підводного апарату, прикріпленого до плавучого буя у тривимірному просторі. Детальні моделі динаміки БПА, буя та пов'язаної прив'язаної системи представлені в морському середовищі, яке включає поверхневі водні течії та коливальні гравітаційні хвилі, а також пориви вітру.

Сформульовано нову проблему морського локомотива з квадрокоптером, який маніпулює швидкістю хвилі плавучого буя за допомогою

троса [8]. Запропонована роботизована система може мати різноманітні нові застосування для БПЛА, де їх висока швидкість та маневреність, а також легкість розгортання та широке поле зору, дають їм чудову перевагу.

В роботі [9] розглянуто тактико-технічні характеристики морських безекіпажних підводних апаратів провідних країн світу, особливості їх застосування не тільки, як науково-дослідних та допоміжних апаратів, а й як підводних апаратів військового призначення.

В роботі [10] моделюючий комплекс динаміки просторового руху підводного апарату, призначений для розгляду перехідних процесів при русі підводного апарату у товщі води.

У монографії [11,12] розглянуто особливості гідродинамічної взаємодії морських конструкцій із хвильовими та течійними збуреннями в умовах Чорного моря. Значну увагу приділено чисельним методам моделювання та експериментальній верифікації отриманих результатів. Проаналізовано розподіл гідродинамічних навантажень і вплив коливань на стійкість конструкцій. Отримані підходи можуть бути адаптовані для оцінки навантажень на корпус АНПА та буксирований буй у складних гідрометеорологічних умовах.

Актуальність представленої роботи 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

*Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми.* Застосування математичного моделювання корпусу апарату з імітацією реальних умов морського середовища надає можливість досягти оптимальних гідродинамічних параметрів АНПА з буксированим радіобуєм без виконання натурних випробувань.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є визначення методології проектування та дослідження гідродинамічних параметрів корпусу автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм в умовах морського середовища.

*Методи, об'єкт та предмет дослідження.* Системний аналіз методів і засобів проектування корпусів апаратів з несучими поверхнями та рушійними пристроями.

Імітаційне моделювання у AUV Sim для перевірки гідродинамічних параметрів корпусу АНПА у змодельованому морському середовищі.

Об'єкт дослідження – корпус автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм.

Предмет дослідження – підвищення якості гідродинамічних параметрів автономного ненаселеного підводного апарату з радіобуєм.

**Виклад основного матеріалу.** Морський робототехнічний комплекс «Автономний ненаселений підводний апарат – буксирований радіобуй», призначений для охорони та технічного моніторингу об'єктів морської критичної інфраструктури в умовах мілководних акваторій, який буде забезпечувати оперативний радіозв'язок з береговим центром керування охоронною місією.

В роботі розглядається радіобуй до якого додаються шліфовані дугоподібні несучі поверхні (крила), що дозволяє досягти максимального ефекту піднімальної сили.

Особливістю системи «АНПА – кабель – радіобуй» є наявність додаткових нелінійних збурень, спричинених хвильовими процесами, течіями та змінним натягом кабелю, що суттєво ускладнює аналітичний опис і вимагає застосування багатофізичних моделей.

З метою уточнення параметрів конструкції буя і несучих поверхонь доцільно застосувати засоби комп'ютерного моделювання динаміки буя в реальному морському середовищі. З цією метою в роботі проведено системний аналіз сучасних засобів моделювання.

Основні критерії вибору програмного продукту:

- повноцінне моделювання 6 DOF;
- урахування зовнішніх збурень;
- підтримка tethered-систем;
- інтеграція систем керування;
- гнучкість параметризації;
- спеціалізація на морських апаратах.

Далі представлено огляд деяких програмних продуктів, які найбільш відповідають критеріям поставленої задачі.

UUV Simulator – це відкрите програмне середовище для моделювання автономних ненаселених підводних апаратів, призначене для дослідження їх динаміки, навігації та алгоритмів керування у віртуальному середовищі [13].

UUV Simulator є розширенням ROS + Gazebo і використовується як віртуальний об'єкт керування для автономних підводних апаратів. Він дозволяє відтворювати рух АНПА у тривимірному водному середовищі з урахуванням гідродинаміки та зовнішніх збурень.

Функціональні можливості UUV Simulator:

- моделювання 6-ступеневої динаміки підводного апарата;

- урахування гідродинамічних сил і моментів (додаткові маси, опори, демпфування);

- моделювання течій і збурень середовища;
- підтримка різних рушіїв і керуючих поверхонь;

- інтеграція з алгоритмами керування через ROS-плагіни.

AUV SIM – це комерційний продукт від Британської фірми Dynautics, яка має великий досвід у проектуванні автономних підводних апаратів та підводних споруд [14]. AUV SIM це повний 3D симулятор динаміки руху автономного підводного апарату з урахуванням можливого впливу течії.

Функціональні можливості AUV SIM:

- створення моделі корпусу апарату з вибором рушіїв;

- імітація руху апарата в морському середовищі;

- можливість обробляти отримані результати.

Важливим фактором для розробників і проєктувальників корпусів підводних роботизованих засобів, яким є АНПА з радіобуєм є можливість створювати модель власного корпусу підводної конструкції використовуючи зручний, зрозумілий користувацький інтерфейс, рис. 1.

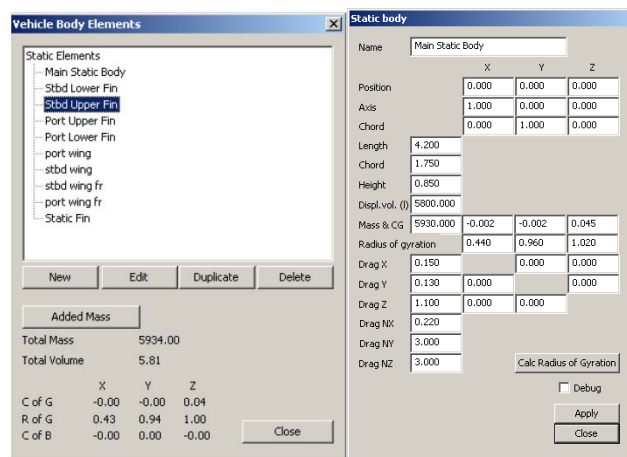


Рис. 1. Інтерфейс створення моделі корпусу АНПА засобами AUV SIM

Наступним етапом розробки необхідного для виконання конкретної місії АНПА є додавання несучих поверхонь (крил), що також передбачено програмним продуктом.

Але головною перевагою є можливість проведення імітаційного моделювання розробленої підводної конструкції в умовах морського середовища. Зручний інтерфейс дозволяє розробнику встановлювати власний сценарій зовнішніх збурень.

Під час експериментів виконується підлаштування форми і розмірів корпусу і несучих повер-

хонь для досягнення оптимальних гідродинамічних показників АНПА, буксированого тросу та радіобуя, що розробляється.

*Обговорення отриманих результатів.* Проектування підводних конструкцій, зокрема автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) з буксированим радіобуєм, пов'язане зі складною взаємодією гідродинамічних, механічних і керуючих процесів, що відбуваються в умовах змінного зовнішнього середовища. В даному випадку, в процесі проектування, доцільним є використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як AUV SIM компанії Dynautics Ltd. Представлений програмний продукт забезпечує моделювання руху підводних апаратів у реалістичних умовах експлуатації. Дана програма дозволяє враховувати гідродинамічні сили та моменти, параметри навколишнього середовища, а також реалізовувати алгоритми автоматичного керування.

Практичне значення результатів дослідження полягає в їх використанні для створення типорозмірного ряду підводних апаратів з буксированими радіобуями різного цільового призначення – від наукових до оборонних і гуманітарних.

**Висновки.** В роботі проведено системний аналіз методів і засобів проектування корпусів апаратів з несучими поверхнями та рушійними пристроями.

Шляхом відповідності чітко визначеним критеріям, в роботі обрано програмний комплекс для перевірки гідродинамічних параметрів корпусу АНПА і буксированого радіобуя у змодельованому морському середовищі.

AUV SIM є доцільним вибором, оскільки поєднує:

- фізично коректну гідродинамічну модель;
- підтримку кабельних систем;
- моделювання керування;
- реалістичне середовище.

#### Список літератури:

1. CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 305. Art. 117911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117911>
2. Tortorici O., Péraud C., Anthierens C., Hugel V. Automated deployment of an underwater tether equipped with a compliant buoy-ballast system. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(2). Art. 279. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12020279>
3. Wang H., Chen J., Feng Z. et al. Development of a mobile buoy with controllable wings: design, dynamics analysis and experiments. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(1). Art. 150. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12010150>
4. Chen D., Wu J. Hydrodynamic response on trajectory tracking of a tethered underwater robot system under hybrid control algorithms. *Discover Applied Sciences*. 2024. Vol. 6. Art. 444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06145-0>
5. Buchholz M., Carlucho I., Grimaldi M., Petillot Y. Tethered multi-robot systems in marine environments. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2508.02264>.
6. Mitra A., Panda J. P., Warrior H. V. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles. *arXiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.13305>.
7. Novak F., Báča T., Saska M. Collaborative object manipulation on the water surface by a UAV-USV team using tethers. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.08580>.
8. Li H., Cao H., Xu J. et al. Numerical simulation of self-propelled dive motion of a virtual mooring buoy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(12). Art. 2120. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122120>
10. Джежулей О. В. Особливості класифікації морських безкіпажних підводних апаратів. *Технічні науки та технології*. 2023. № 4. С. 45–52.
11. Блінцов О. В. Прив'язні підводні апарати: сучасні завдання проектування та застосування. *Збірник наукових праць НУК*. 2012. № 1. С. 12–18.
12. Морева І. М. Гідродинаміка глибоководних платформ для умов Чорного моря. Київ: НАН України, 2015. 180 с.
13. ProteusDS / ShipMo3D. URL: [proteusds.com](http://proteusds.com)
14. AUV SIM. URL: <https://www.dynautics.com/products/vessel-simulators/auv-sim/>

#### Kazymyrenko Yu.O., Hrudinina H.S. METHODOLOGY FOR DESIGNING HOUSING STRUCTURES FOR UNDERWATER VEHICLES

*The design of underwater structures, in particular autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs) with a towed radio buoy, is associated with the complex interaction of hydrodynamic, mechanical and control processes occurring in conditions of a variable external environment. Experimental studies of such systems are costly, time-consuming and limited in terms of variability of conditions, which necessitates the use of*

*modern software modeling tools at the design and optimization stages. The use of numerical methods allows us to investigate the influence of the shape of the AUV body, the parameters of the supporting surfaces, the characteristics of the propulsion and control complex, as well as the dynamics of the cable and the towed buoy on the overall stability and controllability of the system.*

*A feature of the “AUV – cable – radio buoy” system is the presence of additional nonlinear disturbances caused by wave processes, currents and variable cable tension, which significantly complicates the analytical description and requires the use of multi-physics models. In this context, it is advisable to use specialized software, such as AUV SIM from Dynautics Ltd, which provides simulation of the movement of underwater vehicles in realistic operating conditions. This software product allows you to take into account hydrodynamic forces and moments, environmental parameters, and also implement automatic control algorithms.*

*The use of AUV SIM at the design stage allows to reduce the number of full-scale experiments, increase the accuracy of the assessment of operational characteristics and optimize the design parameters of the system even before its physical implementation. Thus, software modeling is a key tool for increasing the efficiency of the development of AUVs with a towed radio beacon and ensuring their reliable operation in difficult hydrometeorological conditions.*

**Keywords:** *computer modeling, autonomous underwater vehicle, towed buoy, hydrodynamic characteristics.*

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026