

## ГЕНЕЗИС ТЕХНОЛОГІЙ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ПОБУДОВИ БУКСИРУВАНИХ ПІДВОДНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МІЛКОВОДНИХ АКВАТОРІЙ

Блінцов В. С., Куценко П. С.

*Об'єктом дослідження є технології проектування буксированих підводних систем для мліководних акваторій. Предметом дослідження є шляхи підвищення продуктивності та зниження витрат на проектування та виробництво буксированих підводних систем.*

*При виконанні дослідження було застосовано методологію системного підходу, методи структурного аналізу, математичного моделювання та 3D-проектування, адитивні технології виготовлення конструкцій буксированих підводних систем.*

*Виконано системний аналіз закономірностей розвитку технологій проектування буксированих підводних систем. Сформульовано перспективні напрямки їх подальшого розвитку як необхідну умову підвищення ефективності проектних робіт на основі сучасного інструментарію проектування та забезпечення конкурентоспроможності на ринку морської техніки. Запропоновано доповнити традиційні етапи проектування таких систем трьома новими етапами, які втілюють сучасні тенденції створення морської техніки. Розроблено генезис технологій проектування буксированих підводних систем як науково-методологічну основу їх подальшого розвитку у напрямку підвищення ефективності проектних робіт та зниження витрат часових і фінансових ресурсів. Теоретично обґрунтовано доцільність розвитку технологій проектування буксированих підводних систем шляхом введення у проектну практику трьох технологій:*

*– технології інформаційного моделювання основних усталених та перехідних режимів буксированих підводних систем на основі системного підходу, доповненого критеріями оцінки витрат на їхнє будівництво та експлуатацію;*

*– BIM-технології (Technologies of the Building Information Modeling) як інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та подальшої експлуатації створюваної буксированої підводної системи;*

*– адитивної технології виробництва елементів та вузлів буксированої підводної системи на основі отриманих результатів від попередніх технологій як ефективного шляху скорочення загальних витрат фінансових і часових ресурсів та зниження собівартості створюваних буксированих підводних систем.*

*Практична значимість роботи полягає у підтвердженні ефективності та промислової перспективності запропонованих технологій, яке було отримане у результаті їх часткового впровадження у проектну та виробничу практику при створенні буксированої підводної системи проекту «Глайдер».*

**Ключові слова:** *буксирована підводна система, інформаційне моделювання, адитивна технологія виробництва, морська техніка.*

### 1. Вступ

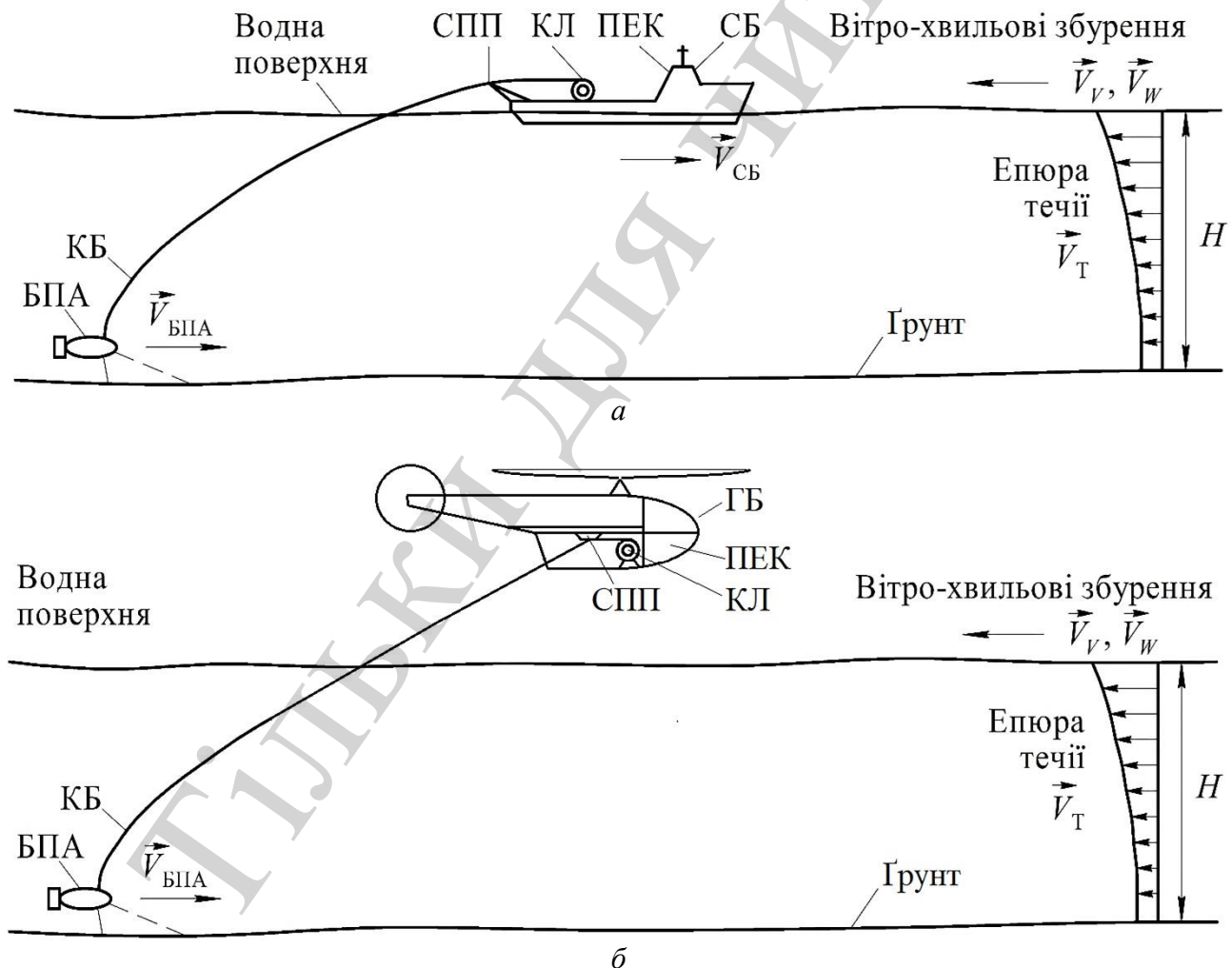
Буксировані підводні системи (БПС) відносяться до традиційних технічних засобів вивчення водного середовища та виконання широкого спектру робіт пошукового, природоохоронного та промислового призначення [1–3]. Значні обсяги таких робіт виконуються на мліководних акваторіях з глибинами до 100 метрів. Саме на таких акваторіях сьогодні проводиться пошук та видобування морегосподарської продукції, виконуються роботи з картографування донної поверхні та безпечної експлуатації прибережних водних транспортних шляхів, підводні археологічні дослідження тощо [4–6]. Це робить актуальним завдання проектування та побудови БПС для мліководних акваторій.

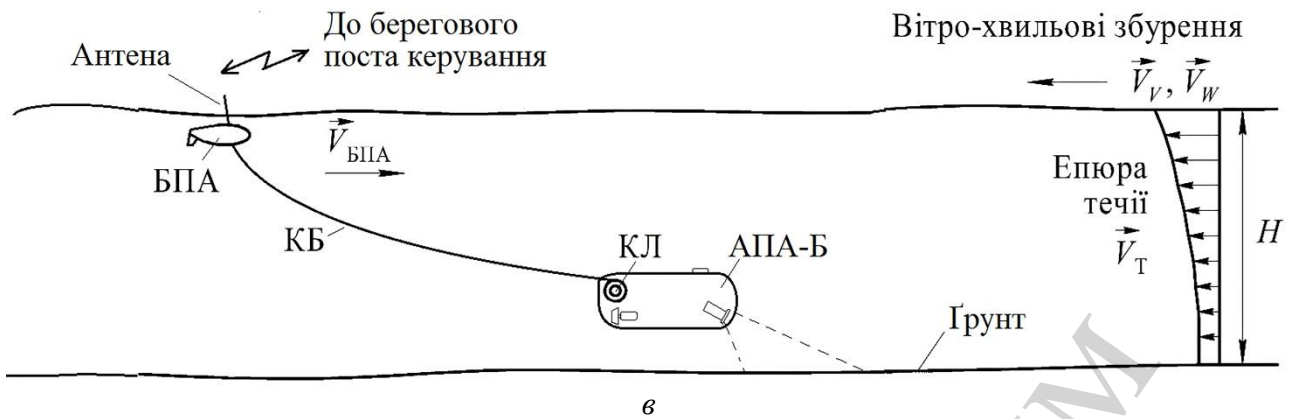
Основні схеми застосування та типовий склад БПС, що буксируються, відповідно, судном-буксирувальником (СБ), гелікоптером-буксирувальником (ГБ) та автономним підводним апаратом-буксирувальником (АПА-Б), наведено на рис. 1.

Зазвичай БПС застосовують з борту судна-буксирувальника (СБ), на якому розміщують надводні складові системи: пост енергетики та керування БПС (ПЕК) та кабельну лебідку (КЛ) [7]. За допомогою КЛ змінюють довжину попущеної частини кабель-буксиру (КБ) в залежності від глибини та швидкості руху СБ, а також зберігають КБ у міжопераційний період (рис. 1, а). Ненаселений буксирований підводний апарат (БПА) опускається на воду перед початком буксирування та піднімається на борт СБ після завершення роботи за допомогою спуско-піднімального пристрою (СПП).

При виконанні пошукових підводних робіт, коли об'єктом пошуку є вибухонебезпечні предмети, або коли такі роботи на віддалених акваторіях необхідно виконувати оперативно, доставку БПС на задану акваторію та її застосування організують з борту гелікоптера [8] (рис. 1, б).

Перспективним напрямком застосування БПС є їх встановлення на малогабаритні ненаселені автономні підводні апарати (АПА), які завдяки буксируванню БПА з радіоантенною отримують можливість працювати під керуванням оператора берегового поста керування у реальному часі [9] (рис. 1, в).





**Рис. 1.** Типові складові ненаселеної буксированої підводної системи:

*a* – буксировання за допомогою надводного судна; *б* – буксировання за допомогою гелікоптера; *в* – буксировання за допомогою підводного апарата

Наведені приклади застосування БПС свідчать, що вони утворюють окремий вид морської техніки, створення якого має виконуватись із застосуванням сучасних методів проектування та будівництва. Це забезпечить зниження собівартості створюваної техніки та її високу конкурентоспроможність на внутрішньому та зовнішньому ринках безпечних підводних систем.

## 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є технології проектування буксированих підводних систем для мілководних акваторій. Предметом дослідження є шляхи підвищення продуктивності та зниження витрат на проектування та виробництво буксированих підводних систем.

Аналіз становлення прикладного наукового напрямку створення засобів морської робототехніки (ЗМР) – проектування та будівництва БПС – є необхідною складовою процесу його подальшого розвитку. Оскільки дає можливість виявити й оцінити його закономірності, а також намітити проблемні питання поточного стану проблеми та їх розв'язку. На цей час питання генезису технологій проектування БПС у науково-технічній літературі не висвітлені.

Іншим напрямком робіт з подальшого розвитку технологій проектування БПС є залучення до їх складу сучасних науково обґрунтованих підходів та методів виконання власне проектних робіт та їх автоматизації. Головною метою тут має бути зменшення витрат ресурсів (людських, фінансових, часових) на створення нових зразків БПС та, як результат, підвищення їх конкурентоспроможності на ринку ЗМР.

## 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є удосконалення методології проектування буксированих підводних систем для мілководних акваторій шляхом впровадження сучасних технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт як основи підвищення конкурентоспроможності на ринку підводної техніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. На основі критичного аналізу сучасних технологій проектування об'єктів морської техніки обґрунтувати доцільність та можливість залучення до процесу проектування БПС новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт.

2. Сформулювати змістовну частину новітніх технологій проектування та побудови БПС, які ґрунтуються на сучасних досягненнях науки та техніки.

3. Привести результати практичного використання новітніх технологій проектування та побудови БПС і показати їх ефективність для малосерійного продукування БПС.

#### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Проектування засобів морської техніки відноситься до складних видів інженерної діяльності, який поєднує виконання великого обсягу розрахункових робіт і виготовлення робочих креслень для їх побудови [10, 11]. У більшості випадків такі роботи вимагають попереднього проведення робіт науково-дослідницького та виробничого характеру [2, 12]. У сучасній науково-технічній та виробничій літературі найбільш повно висвітлені питання наукових досліджень та проектування БПС. Так, у роботі [13] обґрунтовано доцільність застосування БПС на мілководних акваторіях, проте, питання проектування такої техніки автори не розглядають.

У роботі [14] висвітлено можливості застосування сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) у суднобудівній галузі. Зокрема, розглядаються питання розв'язку прикладних науково-дослідних робіт та їх використання у конструкторській діяльності. Практичну цінність для конструкторів має порівняльний аналіз найбільш застосовуваних САПР. Однак, автори не роблять необхідних узагальнень щодо об'єднання питань дослідницького проектування та виготовлення креслень для будівництва суден.

Робота [15] присвячена застосуванню CAD-систем (Computer-aided design) розробки геометричних моделей конструктивних елементів суден. Проте, застосування таких систем для конструювання корпусів підводних апаратів автори не розглядають.

У роботі [16] розглянуто питання проектування підводного маніпулятора на основі застосування CAD-платформи Robot Operating System, однак питання автоматизації інших елементів підводних апаратів не розглядаються.

У роботах [17, 18] досліджуються питання практичного застосування прикладних пакетів програм, відповідно, MATLAB® і Simulink® та SolidWorks для комп'ютерного моделювання (using CAD) підводних роботизованих транспортних засобів. Однак, поза увагою авторів залишилися питання системного підходу по процесу проектування та його автоматизації.

Робота [19] присвячена геометричному моделюванню поверхонь судна у середовищі автоматизованої системи проектування КОМПАС-3D. Автори розглядають спосіб моделювання корпусу судна на основі застосування методу плоских перерізів, способи підвищення точності каркасної поверхні судна, що моделюється та ін. Однак, геометричне моделювання гідродинамічних форм підводних апаратів у роботі не розглядається.

Таким чином, проведений аналіз публікацій свідчить, що на сьогодні дослідники та конструктори морської техніки сконцентрували основну увагу на автоматизації типових розрахункових робіт з проектування суден та на комп'ютерних технологіях виконання окремих наукових досліджень. Автоматизація проектування ЗМР, зокрема, буксированих підводних апаратів і систем, знаходиться на початковій стадії свого розвитку.

Тому одним з перспективних напрямків подальшого удосконалення методів проектування ЗМР є розробка генезису (опису походження, становлення та розвитку) технологій проектування БПС та пошук шляхів підвищення їх ефективності для забезпечення конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішньому ринках підводної техніки.

#### **5. Методи дослідження**

При дослідженні були використані наступні наукові методи:

- метод системного аналізу при вивченні існуючих етапів розвитку методів проектування БПС та визначенні напрямків їх подальшого розвитку;
- метод структурного аналізу при формулюванні змістовної частини новітніх технологій проектування та побудови БПС;
- метод інформаційного моделювання при створенні 3D-моделей та інформаційних моделей буксированого підводного апарата як складової БПС;

- метод інформаційного моделювання об'єктів будівництва (ВІМ-технологію) для інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та подальшої експлуатації створеної БПС;
- методологію системного підходу з використанням рівнянь існування складових БПС на ранніх стадіях проектування БПС;
- методологію адитивних технологій для організації малосерійного виробництва елементів і вузлів БПС.

## **6. Результати дослідження**

### **6.1. Генезис технологій проектування БПС**

Аналіз методів проектування БПС свідчить, що їх розвиток відбувався за наступними укрупненими етапами, типовими для суднобудівної галузі у цілому:

- ручне проектування (МР), коли креслення елементів і вузлів БПС виконувались конструкторами вручну на кульманах, а результиуючим продуктом роботи була проектна документація на паперових носіях;
- двовимірне (2D) проектування як початковий етап автоматизації ручної праці конструкторів, результатом якого була проектна документація в електронних форматах «.pdf», «.dwt», «.dwg», створених за допомогою програмних продуктів Autodesk, AutoCAD та ін. Для цього етапу характерною є реалізація принципів САД-проектування (в англійській літературі – Computer Aided Design) та водночас – відсутність повноцінних інформаційних зв'язків між проєктантами БПС [20];
- тривимірне (3D) проектування, яке побудоване на принципах геометричного моделювання та управління цифровою впорядкованою проектною інформацією, згенерованою 2D/3D САД-системами та збереженою у спільному середовищі даних (в англійській літературі – Common Desktop Environment, CDE) [19]. Результатом тривимірного проектування є набір структурованих контейнерів (наборів даних) про спроектовану БПС, які утворюють інформаційну основу для генерації робочої конструкторської документації для її побудови;
- системи комп'ютерної підтримки інженерних розрахунків (в англійській літературі – Computer-Aided Engineering, CAE), призначені для розв'язку інженерних завдань, наприклад, для розрахунків конструктивної міцності, оцінки сил гідродинамічної природи, розрахунків елементів, вузлів і систем БПС [21].

На сьогодні у суднобудівній галузі вказані етапи розвитку методів проектування сформувались у низку спеціалізованих систем автоматизованого проектування (САПР), які широко застосовуються у проектній практиці провідних компаній. До найбільш відомих САПР належать FORAN (Іспанія), TRIBON (Швеція), NUPAS-CAD/MATIC (Голландія та Фінляндія), CATIA (США) та інші [22].

Проте, у практиці проектування БПС вказані САПР фактично не застосовуються з-за їх специфіки, пов'язаної з проектуванням морських суден та яхт.

Аналіз розвитку інших галузей промисловості (будівельної, авіаційної тощо), а також досвід авторів у проектуванні, будівництві та експлуатації ЗМР дає змогу доповнити наведені вище чотири етапи проектування БПС трьома додатковими етапами. Запропоновані етапи вже реалізовані у практичній діяльності науково-дослідного інституту підводної техніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв, Україна), або плануються до реалізації найближчим часом:

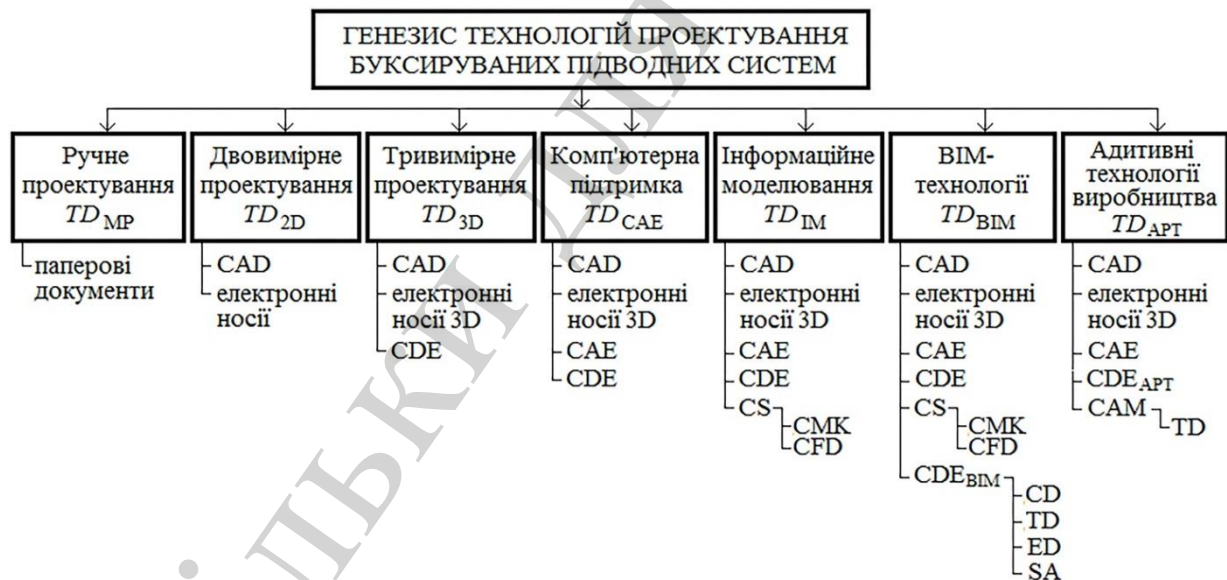
- етап інформаційного моделювання (в англійській літературі – Information Modeling, ІМ) БПС, який охоплює процеси створення та використання скоординованих між собою структурованих інформаційних моделей. Вказані моделі описують технічні та експлуатаційні характеристики об'єкта проектування та об'єктно-орієнтовані тривимірні геометричні характеристики його складових, що створюються різними учасниками протягом життєвого циклу об'єкта проектування в рамках CDE. Відмінною особливістю етапу ІМ є широке використання методів комп'ютерного моделювання (в англійській літературі – Computer Simulations, CS) для дослідження режимів роботи майбутньої БПС в усталених та динамічних режимах. А та-

кож для використання отриманих даних у проектних рішеннях – від розробки спеціалізованих моделюючих комплексів (СМК) [23, 24] і до використання програм обчислювальної гідродинаміки (в англійській літературі – Computational Fluid Dynamics, CFD [25]). Результатом інформаційного моделювання є нові знання про властивості створюваної БПС, які дають змогу уточнити експлуатаційні характеристики БПС вже на ранніх стадіях її проектування;

– етап ВІМ-технологій (в англійській літературі – Building Information Modelling, ВІМ), які передбачають використання спільного цифрового представлення об'єкту, що створюється, для інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та експлуатації. Метою створення надійної основи для прийняття рішень [26]. Сьогодні такі технології реалізують новітні підходи до конструювання будівель; їх застосування у створенні БПС має передбачати збір і комплексну обробку конструкторської (CD), технологічної (TD) та економічної (ED) інформації про БПС у процесі її проектування. Результатом цього етапу має бути спільне середовище даних CDE<sub>ВІМ</sub>, яке дасть змогу вже на ранніх стадіях проектування оцінювати як технічні, так і економічні характеристики створюваного нового зразка підводної техніки;

– етап забезпечення адитивних технологій виробництва (в англійській літературі – Additive Production Technologies, АРТ), який передбачає інтеграцію проектних робіт з виготовленням спроектованих деталей, елементів та вузлів БПС шляхом їх 3D-друку. За ними продукують вироби за даними тривимірної цифрової моделі (етап 3D-проектування) методом шарового додавання конструкційних матеріалів [27]. Результатом цього етапу є виготовлені за технологіями 3D-друку несерійні елементи та деталі конструкцій БПС, які мають суттєво нижчу собівартість у порівнянні з традиційними технологіями малосерійного виробництва.

Генезис (походження, становлення, розвиток) технологій проектування БПС (в англійській літературі – Technologies of Design, TD) наведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Генезис технологій проектування буксированих підводних систем

На рис. 2 підстрочні індекси відповідають наведеним вище етапам розвитку методів проектування.

Розглянемо змістовну частину трьох останніх етапів більш детально.

## 6.2. Етап інформаційного моделювання БПС

Етап інформаційного моделювання суттєво впливає на подальшу ефективність майбутньої БПС, оскільки саме тут вже на ранніх стадіях проектування визначаються її основні проектні параметри та експлуатаційні характеристики.



Зазвичай, на цьому етапі проводяться прикладні наукові дослідження для попередньої оцінки властивостей БПС в основних режимах роботи (квазістаціонарних та у перехідних режимах), виконується попередня перевірка гідродинамічних характеристик БПА тощо.

Виходячи з практики авторів у проектуванні БПС, можна сформулювати наступні першочергові задачі для створення технології інформаційного моделювання  $TD_{IM}$ :

– розробка 3D-моделей  $IM_{3D}$  складових БПС (у першу чергу – розробка конструкції БПА як найбільш складного об’єкту проектування). У якості інструментальних засобів тут доцільно використовувати прикладні пакети дво- і тривимірної інтерактивної системи автоматизованого проектування (CAD-пакети програм AutoCAD та/чи КОМПАС-3D [19, 28]);

– створення інформаційних (математичних) моделей  $IM_{БПС}$  складових БПС (у першу чергу – БПА, КБ) як твердих і гнучких тіл у потоці води, які мають силову взаємодію між собою – для комп’ютерного дослідження усталених і динамічних режимів роботи БПС. Інструментальним засобом тут доцільно використовувати пакет прикладних програм для розв’язку задач інженерних розрахунків Matlab [29] або створювати спеціалізовані моделюючі комплекси для проведення масових багатоваріантних розрахунків [23, 24];

– створення інформаційних (математичних) моделей  $IM_{САК}$  систем автоматичного керування складовими БПС в основних робочих та аварійних режимах – для перевірки керованості БПС та якості виконуваної підводної роботи [30]. У якості інструментальних засобів тут також доцільно використовувати пакети програм Matlab та/або спеціалізовані моделюючі комплекси;

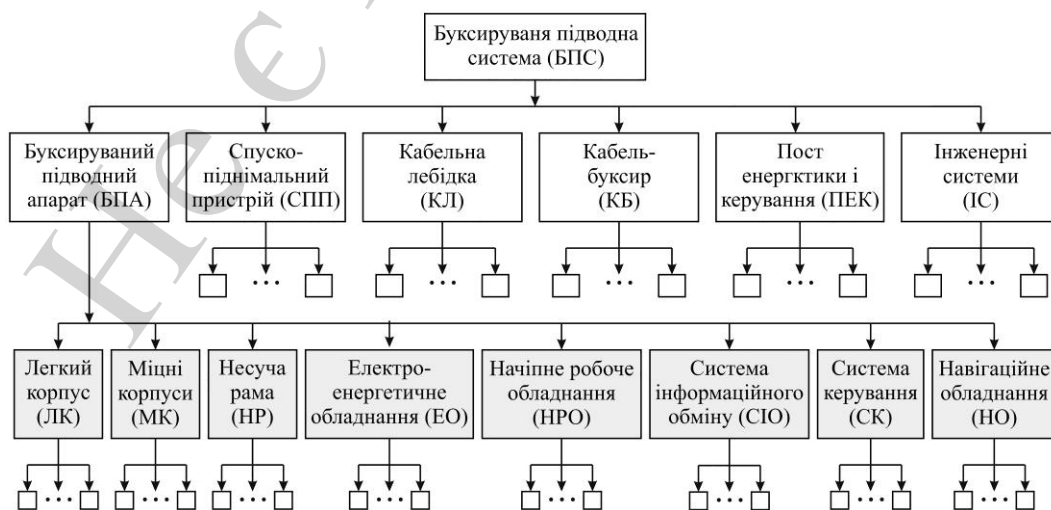
– розробка 3D-моделей БПА  $IM_{CFD}$  для дослідження їх гідродинамічних характеристик. У якості інструментального засобу тут доцільно використовувати пакет прикладних програм FlowVision CFD, який призначений для розв’язку тривимірних стаціонарних і нестаціонарних рівнянь динаміки рідини і газу [31].

Таким чином, основні задачі створення технології інформаційного моделювання  $TD_{IM}$  можна представити наступною множиною математичних моделей  $IM$ :

$$IM = \{IM_{3D}; IM_{БПС}; IM_{САК}; IM_{CFD}\}. \quad (1)$$

Практична реалізація етапу інформаційного моделювання на ранніх стадіях проектування суттєво впливає на продуктивність і якість подальших проектних робіт. А також відкриває широкі можливості для зниження витрат ресурсів на конструювання та виготовлення як елементів БПС, так і на його будівництво.

Узагальнена структура БПС як об’єкту інформаційного моделювання на ранніх стадіях проектування показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Узагальнена структура буксированої підводної системи як об’єкту інформаційного моделювання на ранніх стадіях проектування

На рис. 3 додатково до типових складових БПС, наведених на рис. 1, введена складова «Інженерні системи», яка містить транспортний візок для переміщення БПА по палубі СБ, облаштування для технічного обслуговування БПС в умовах експлуатації тощо. Врахування цієї складової робить перелік робіт з проектування БПС більш повним.

Особливості реалізації технології інформаційного моделювання  $TD_{IM}$  розглянемо на прикладі інформаційного моделювання БПА як найбільш наукоємної складової створюваної системи.

На рис. 3 затемненням виділено БПА як складова частина БПС та основні його елементи:

– конструктивні елементи – легкий корпус (ЛК), функції якого виконує гідродинамічний обтічник БПА; міцні корпуси електрообладнання (МК); несуча рама (НР) як силовий конструктив БПА;

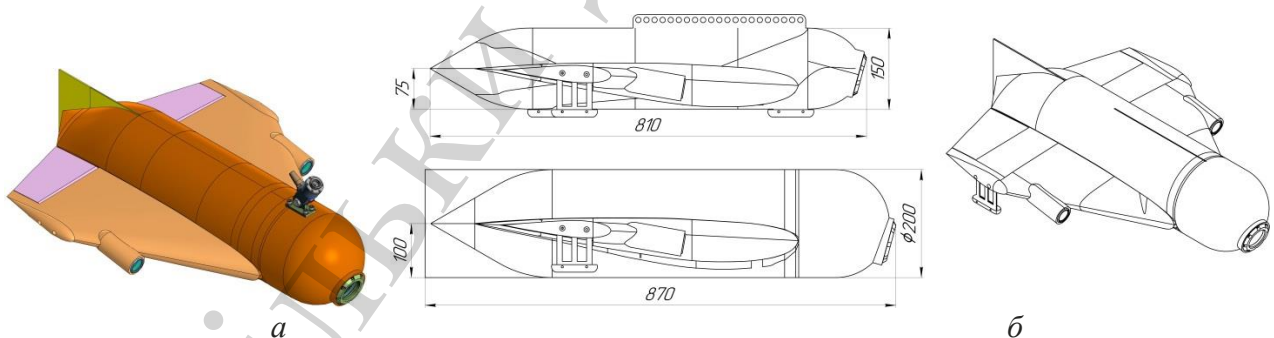
– енергетичні елементи БПА – електроенергетичне обладнання (система електроживлення, електроприводи повороту рулів, підводні світильники тощо); начіпне робоче обладнання (пошукові відео- та гідроакустичні прилади, пробовідбірники води, сенсори гідрофізичних та гідрохімічних приладів тощо);

– інформаційні елементи – систем інформаційного обміну з ПЕК та ручного чи автоматичного керування рухом БПА та начіпним робочим обладнанням; навігаційне обладнання (сенсори просторового положення БПА, лінійних і кутових швидкостей і прискорень).

На прикладі БПА розглянемо особливості створення технології інформаційного моделювання  $TD_{IM-БПА}$ .

Розробка 3D-моделей БПА  $IM_{3D-БПА}$  вже на ранніх стадіях проектування має забезпечити скорочення термінів виконання проектних робіт та зниження загальної вартості проектування, виключити дублювання значного обсягу робіт, виконуваних на наступних стадіях. Для цього розробка 3D-моделі БПА, починаючи з ескізного проекту, ведеться із застосуванням того ж програмного інструмента (CAD-пакети програм AutoCAD та КОМПАС-3D), що й на етапах технічного та робочого проекту та стадії виготовлення. Це забезпечує отримання як 3D-моделі БПА, так і 2D-моделей БПА, необхідних для виготовлення робочих креслень.

На рис. 4, а показано 3D-модель легкого корпусу БПА проекту «Глайдер» виробництва Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Вона дає змогу генерувати 2D-креслення об'єкту проектування для подальшого використання у виробництві (рис. 4, б). БПА проекту «Глайдер» відповідає схемі буксирування, зображеній на рис. 1, а.



**Рис. 4.** 3D-модель легкого корпусу буксируваного підводного апарата проекту «Глайдер»:

а – 3D-модель легкого корпусу (CAD-пакет програми КОМПАС-3D);

б – 2D-креслення на основі 3D-моделі

Практика проектування БПА проекту «Глайдер» свідчить, що впровадження 3D-технологій проектування на ранніх стадіях їх розробки забезпечує зниження витрат часу конструкторів в межах 25–30 % у порівнянні з традиційною технологією 2D-проектування.

Створення інформаційних моделей БПА  $IM_{БПС-БПА}$  як складової БПС має на меті, у першу чергу, дослідження його властивостей у квазістаціонарних (усталених) та динамічних (перехідних) режимах. Зазвичай, такі моделі створюють на основі систем нелінійних дифе-



ренціально-алгебраїчних рівнянь та використовують у складі спеціалізовані моделюючі комплекси, де також присутні математичні моделі КБ, СПП, КЛ та моделі зовнішніх збурень (вітро-хвильових, течії, хитавиці СБ).

На цей час теорія математичного моделювання морських рухомих об'єктів взагалі та БПА, зокрема, розроблена досить повно. У багатьох практичних випадках при створенні БПА використовують його математичний опис як твердого тіла в рідині, що набігає [32]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_{\Delta} \vec{P}}{dt} + \vec{\omega} \cdot \vec{P} &= \vec{F}; \\ \frac{d_{\Delta} \vec{L}}{dt} + \vec{\omega} \cdot \vec{L} + \vec{v} \cdot \vec{P} &= \vec{M}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $\vec{P}$  – кількість руху (імпульс) твердого тіла;  $\vec{F}$  – головний вектор зовнішніх сил;  $\vec{L}$  – момент кількості руху (момент імпульсу) твердого тіла відносно його полюсу;  $\vec{M}$  – головний момент зовнішніх сил відносно полюсу твердого тіла; індекс  $\Delta$  знака диференціала означає, що похідна вектора розраховується відносно базису  $A$ , тобто базису системи координат, зв'язаної з корпусом БПА.

Гідродинамічні (в'язкі) сили та моменти з'являються на корпусі БПА внаслідок взаємодії з навколишнім водним середовищем при його русі. Визначення цих сил є комплексним завданням гідромеханіки, для розв'язку якого застосовуються методи та засоби обчислювальної гідродинаміки та, за необхідністю, методи басейнових та морських натурних випробувань [31, 33].

Але при моделюванні БПА користуються спрощеним представленням цих сил та моментів шляхом їх представлення у вигляді суми лінійної та квадратичної залежностей від швидкості руху БПА по відношенню до водного середовища [34]:

$$T_h = [\vec{F}_h \vec{M}_h]^T = D(V)V, \quad (3)$$

де  $\vec{F}_h$  – вектор гідродинамічних сил опору;  $\vec{M}_h$  – гідродинамічний момент опору;  $D$  – матриця параметрів опору;  $V$  – матриця швидкостей (поступальних та обертових) БПА по відношенню до води.

Гідродинамічні коефіцієнти, які містить матриця  $D$ , вважаються константними. Для тіла, повністю зануреного у воду, приймається наступне припущення:

$$D(V) = -\left( \text{diag} \{a_l, b_l, c_l, p_l, q_l, r_l\} + \text{diag} \{a_q |v_x|, b_q |v_y|, c_q |v_z|, p_q |\omega_x|, q_q |\omega_y|, r_q |\omega_z|\} \right),$$

де  $a_{l,q}, b_{l,q}, c_{l,q}, p_{l,q}, q_{l,q}, r_{l,q}$  – параметри гідродинамічного опору БПА;  $v_{x,y,z}$  та  $\omega_{x,y,z}$  – проекції, відповідно, векторів поступальної та обертової швидкостей БПА на осі системи координат, зв'язаної з корпусом БПА.

Досвід застосування спрощених математичних моделей БПС у дослідженнях квазістаціонарних та перехідних режимів БПС свідчить, що за їх допомогою вже на ранніх стадіях проектування можна отримати суттєво нові дані щодо властивостей новостворюваної системи. Зокрема, при проектуванні БПС проекту «Глайдер» було досліджено вплив кабель-буксиру на роботу БПС та синтезовано високоефективні системи автоматичного керування БПА [35].

Створення інформаційних (математичних) моделей  $IM_{САК-БПА}$  системи автоматичного керування (САК) БПА є важливою складовою проектних робіт на ранніх стадіях їх створення. Це обумовлено тим, що у сукупності з інформаційними моделями буксируваного під-

водного апарата  $MM_{\text{БПС-БПА}}$  та кабель-буксира  $MM_{\text{БПС-КБ}}$  дає змогу суттєво скоротити витрати часу на розробку ефективних регуляторів просторового руху БПА та забезпечити необхідну якість їх функціонування.

Додаткова перевага інформаційного моделювання системи «БПА – КБ», що мають силу взаємодію у потоці води, полягає у відмові від трудомістких і вартісних морських натурних випробувань БПС та заміні їх технологіями комп'ютерного дослідження, включаючи й аварійні режими [36].

Одним з практичних результатів, що підтверджують ефективність застосування інформаційних моделей САК є синтез двохвимірної системи автоматичного керування обертовим рухом БПА на малих глибинах в умовах невизначеності [30].

*Розробка 3D-моделей БПА  $IM_{\text{CFD-БПА}}$  для дослідження їх гідродинамічних характеристик* відноситься до задач обчислювальної гідродинаміки та передбачає чисельний розв'язок диференціальних рівнянь в'язкої рідини (рівнянь Нав'є-Стокса) методом кінцевих різниць або кінцевого об'єму. Перспективність цього підходу обумовлена використанням найбільш загальних й строгих постановок при дослідженні задач обтікання твердих тіл рідиною [37].

Основна відмінність прикладних програм FlowVision CFD від аналогів полягає в автоматичній генерації розрахункової сітки. В них реалізована автоматична генерація розрахункової сітки з використанням адаптивної локально здрібненої сітки. Завдяки цій технології користувач задає тільки загальну конфігурацію прямокутної початкової сітки, а побудова складних за формою осередків поблизу поверхонь із граничними умовами виконується автоматично.

Вказана технологія вимагає значних обчислювальних ресурсів, тому її застосування для задач проектування БПА знаходиться на початковій фазі.

У цілому, технологія інформаційного моделювання БПА  $TD_{\text{IM-БПА}}$  згідно (1) буде складатись з наступних груп інформаційних моделей:

$$IM_{\text{БПА}} = \{IM_{\text{3D-БПА}}; IM_{\text{БПС-БПА}}; IM_{\text{САК-БПА}}; IM_{\text{CFD-БПА}}\}. \quad (4)$$

Таким чином, застосування інформаційного моделювання БПА  $TD_{\text{IM-БПА}}$  на ранніх стадіях проектування дає змогу отримати нові знання про об'єкт проектування та його експлуатаційні властивості, а також виконати пошук ефективних конструкторських рішень.

### 6.3. Етап ВІМ-технологій у проектуванні БПС

Сутність ВІМ-технологій у проектуванні БПС полягає в забезпеченні інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та подальшої експлуатації створюваної БПС. У цій роботі розглянемо можливі напрямки вдосконалення процесів проектування та будівництва БПС шляхом залучення наступних сучасних методів та технологій.

*Застосування системного підходу.* Пропонується проектування БПС на ранніх стадіях (технічна пропозиція, ескізний проект) вести на основі системного підходу (в англійській літературі – System Approach, SA) з використанням рівнянь існування складових БПС за відомими конструктивним  $A$ , енергетичним  $P$ , інформаційним  $I$  та експлуатаційним  $J$  критеріями [38]. Згідно цьому підходу для кожної складової БПС (БПА, КЛ, КБ, СПП, ПЕК) вводяться у розгляд наступні дві множини матриць, кожна з яких містить технічні характеристики БПС за вказаними критеріями:

1) множина матриць обмежень технічного завдання (ТЗ) на конструктивні, енергетичні, інформаційні та експлуатаційні характеристики складових створюваної БПС:

$$ET_{\text{БПС}} = \{ET_{\text{БПА}}; ET_{\text{КБ}}; ET_{\text{КЛ}}; ET_{\text{СПП}}; ET_{\text{ПЕК}}\};$$

2) множина матриць конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик складових БПС, отриманих на поточному етапі проектування:

$$EE_{БПС} = \{EE_{БПА}; EE_{КБ}; EE_{КЛ}; EE_{СПП}; EE_{ПЕК}\}.$$

Кожна складова множини матриць  $ET$  представляє собою матрицю-стовпець вимог ТЗ або сформульованих на основі ТЗ більш детальних вимог до конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових БПС:

$$ET_{БПА} = \begin{vmatrix} A_{БПА} \\ P_{БПА} \\ I_{БПА} \\ J_{БПА} \end{vmatrix}; ET_{КБ} = \begin{vmatrix} A_{КБ} \\ P_{КБ} \\ I_{КБ} \\ J_{КБ} \end{vmatrix}; ET_{КЛ} = \begin{vmatrix} A_{КЛ} \\ P_{КЛ} \\ I_{КЛ} \\ J_{КЛ} \end{vmatrix};$$

$$ET_{СПП} = \begin{vmatrix} A_{СПП} \\ P_{СПП} \\ I_{СПП} \\ J_{СПП} \end{vmatrix}; ET_{ПЕК} = \begin{vmatrix} A_{ПЕК} \\ P_{ПЕК} \\ I_{ПЕК} \\ J_{ПЕК} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Кожна складова множини матриць  $EE_{БПС}$  представляє собою матрицю-стовпець, відповідно, конструктивних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних характеристик відповідних складових БПС, отриманих на  $i$ -й поточній ітерації проектних розрахунків:

$$EE_{БПАi} = \begin{vmatrix} A_{БПАi} \\ P_{БПАi} \\ I_{БПАi} \\ J_{БПАi} \end{vmatrix}; EE_{КБi} = \begin{vmatrix} A_{КБi} \\ P_{КБi} \\ I_{КБi} \\ J_{КБi} \end{vmatrix}; EE_{КЛi} = \begin{vmatrix} A_{КЛi} \\ P_{КЛi} \\ I_{КЛi} \\ J_{КЛi} \end{vmatrix};$$

$$EE_{СППi} = \begin{vmatrix} A_{СППi} \\ P_{СППi} \\ I_{СППi} \\ J_{СППi} \end{vmatrix}; EE_{ПЕКi} = \begin{vmatrix} A_{ПЕКi} \\ P_{ПЕКi} \\ I_{ПЕКi} \\ J_{ПЕКi} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Зазначимо, що кожний елемент матриць-стовпців (6) являє собою суму, відповідно, конструктивних  $A$ , енергетичних  $P$ , інформаційних  $I$  та функціональних  $J$  характеристик тої чи іншої складової створюваної БПС.

Попарне порівняння відповідних елементів матриць-стовпців (5) і (6) після кожної ітерації проектних розрахунків дає можливість конструктору вже на ранніх стадіях проектування визначити рівень відповідності поточних технічних рішень щодо складових БПС вимогам ТЗ згідно критеріїв  $A$ ,  $P$ ,  $I$  та  $J$ .

Виходячи з сутності ВІМ-технологій [26] пропонується до відомих матричних рівнянь (5), (6) увести дві групи критеріїв для попередньої оцінки витрат ресурсів, відповідно, на будівництво (критерій  $B$ ) та експлуатацію (критерій  $O$ ) БПС.

Уведення у проектну практику зазначених критеріїв дає змогу вже на ранніх стадіях проектування БПС оцінити її собівартість створення як об'єкту малосерійного виробництва, та конкурентоздатність на ринку засобів морської робототехніки, а також оцінити витрати на експлуатацію БПС.

Тоді матричні відношення (5), (6) будуть доповнені вищезазначеними критеріями та будуть мати вид:

$$\begin{aligned}
 ET_{\text{БПА}} &= \begin{vmatrix} A_{\text{БПА}} \\ P_{\text{БПА}} \\ I_{\text{БПА}} \\ J_{\text{БПА}} \\ B_{\text{БПА}} \\ O_{\text{БПА}} \end{vmatrix}; \quad ET_{\text{КБ}} = \begin{vmatrix} A_{\text{КБ}} \\ P_{\text{КБ}} \\ I_{\text{КБ}} \\ J_{\text{КБ}} \\ B_{\text{КБ}} \\ O_{\text{КБ}} \end{vmatrix}; \quad ET_{\text{КЛ}} = \begin{vmatrix} A_{\text{КЛ}} \\ P_{\text{КЛ}} \\ I_{\text{КЛ}} \\ J_{\text{КЛ}} \\ B_{\text{КЛ}} \\ O_{\text{КЛ}} \end{vmatrix}; \\
 ET_{\text{СПП}} &= \begin{vmatrix} A_{\text{СПП}} \\ P_{\text{СПП}} \\ I_{\text{СПП}} \\ J_{\text{СПП}} \\ B_{\text{СПП}} \\ O_{\text{СПП}} \end{vmatrix}; \quad ET_{\text{ПЕК}} = \begin{vmatrix} A_{\text{ПЕК}} \\ P_{\text{ПЕК}} \\ I_{\text{ПЕК}} \\ J_{\text{ПЕК}} \\ B_{\text{ПЕК}} \\ O_{\text{ПЕК}} \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 EE_{\text{БПА}i} &= \begin{vmatrix} A_{\text{БПА}i} \\ P_{\text{БПА}i} \\ I_{\text{БПА}i} \\ J_{\text{БПА}i} \\ B_{\text{БПА}i} \\ O_{\text{БПА}i} \end{vmatrix}; \quad EE_{\text{КБ}i} = \begin{vmatrix} A_{\text{КБ}i} \\ P_{\text{КБ}i} \\ I_{\text{КБ}i} \\ J_{\text{КБ}i} \\ B_{\text{КБ}i} \\ O_{\text{КБ}i} \end{vmatrix}; \quad EE_{\text{КЛ}i} = \begin{vmatrix} A_{\text{КЛ}i} \\ P_{\text{КЛ}i} \\ I_{\text{КЛ}i} \\ J_{\text{КЛ}i} \\ B_{\text{КЛ}i} \\ O_{\text{КЛ}i} \end{vmatrix}; \\
 EE_{\text{СПП}i} &= \begin{vmatrix} A_{\text{СПП}i} \\ P_{\text{СПП}i} \\ I_{\text{СПП}i} \\ J_{\text{СПП}i} \\ B_{\text{СПП}i} \\ O_{\text{СПП}i} \end{vmatrix}; \quad EE_{\text{ПЕК}i} = \begin{vmatrix} A_{\text{ПЕК}i} \\ P_{\text{ПЕК}i} \\ I_{\text{ПЕК}i} \\ J_{\text{ПЕК}i} \\ B_{\text{ПЕК}i} \\ O_{\text{ПЕК}i} \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Наприклад, собівартість будівництва  $i$ -го варіанту БПА  $V_{\text{БПА}i}$  можна оцінити як суму витрат ресурсів на проектування  $V_{\text{БПА-ЗД}}$ , інформаційного моделювання  $V_{\text{БПА-ІМ}i}$  та виготовлення  $V_{\text{БПА-АРТ}i}$  БПА. Експлуатаційні витрати на протязі життєвого циклу  $i$ -го варіанту БПА укрупнено можна оцінити сумою витрат на технічне обслуговування БПА  $O_{\text{БПА-ТО}i}$  та капітальні ремонти  $O_{\text{БПА-КР}i}$ . Розробка змістовної частини рівнянь (7), (8) є окремою інженерною задачею та тут не розглядається.

Зазначимо, що залежності (7), (8) утворюють повну множину оцінок щодо спроможності створення (проектування, побудови та експлуатації) БПС у відповідності до вимог ТЗ.

#### 6.4. Етап забезпечення адитивних технологій виробництва БПС

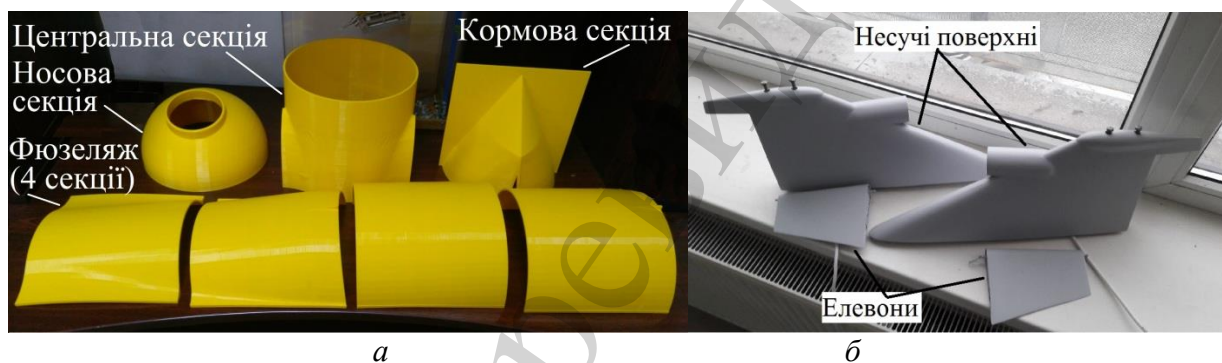
Адитивні технології виробництва елементів та вузлів БПС дають змогу суттєво скоротити витрати ресурсів (часу, фінансів тощо) на створення як діючих макетів, так і дослідних та серійних зразків БПС. Фактично з появою 3D-принтерів забезпечується стрімкий перехід від класичної САМ-технології (в англійській літературі – Computer-Aided Manufacture, САМ) керування станками з числовим програмним управлінням до безвідходної технології адитивного виготовлення деталей БПА.

Практичний досвід використання адитивних технологій у виробництві БПС свідчить, що до першочергових об'єктів для такої технології можна віднести легкі корпуси (ЛК) та несучі рамні конструкції (НР) БПА, а також міцні корпуси (МК) для електрообладнання БПА (рис. 3). Так, досвід авторів по виготовленню на 3D-принтерах легкого корпусу (гідродинамічного обтічника) та несучої рами БПА проекту «Глайдер» дає змогу стверджувати наступне:

– 3D-принтер є ідеальним інструментом для прямого застосування 3D-моделей БПА у виробництві деталей;

– отримані деталі можливо застосовувати як безпосередньо у конструкції БПА, так і в якості макетів (геометричних моделей) цих деталей для їх подальшого поверхневого зміцнення (наприклад, за допомогою склопластика).

На рис. 5 показано результати виготовлення на 3D-принтері елементів легкого корпусу (гідродинамічного обтічника) БПА проекту «Глайдер» та його несучих поверхонь, 3D-моделі яких було розроблено за допомогою САД-паketу програми КОМПАС-3D.



**Рис. 5.** Виготовлені за допомогою 3D-принтера елементи:

*a* – легкого корпусу несучих поверхонь; *б* – елевонів БПА проекту «Глайдер»

Досвід застосування адитивних технологій виробництва зазначених елементів БПА проекту «Глайдер» показав, що витрати часу на їх виготовлення знизились у 15–20 разів у порівнянні з традиційною технологією ручного виготовлення матриць та їх обклеювання склопластиком. При цьому, собівартість виконаних виробничих робіт знизилась у 12–15 разів.

Отримані результати свідчать, що адитивні технології дають змогу продукувати широкий спектр елементів конструкцій БПС, починаючи з дрібних деталей конструкцій її складових (рис. 3) і закінчуючи міцними корпусами (МК) БПА та рамними конструкціями інженерних систем (ІС) БПС.

#### 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* У результаті виконаних досліджень визначено напрямки удосконалення технологій проектування та будівництва буксируваних підводних систем для мілководних акваторій, оскільки саме на цих акваторіях сьогодні ведеться активна господарча та наукова діяльність.

Виконаний огляд етапів розвитку та застосування технологій проектування та будівництва БПС дав змогу доповнити їх перелік трьома етапами, які втілюють сучасні тенденції створення нової техніки:

– технології інформаційного моделювання основних усталених та перехідних режимів БПС на основі системного підходу, доповненого критеріями оцінки витрат на їхнє будівництво та експлуатацію;

– BIM-технології як технології інформаційної підтримки процесів проектування, будівництва та подальшої експлуатації створеної буксируваної підводної системи;

– адитивні технології виробництва елементів та вузлів БПС на основі отриманих результатів попередніх етапів як магістральний шлях скорочення загальних витрат фінансових і часових ресурсів та зниження собівартості створюваних БПС.

Запропоновані технології забезпечують сучасний рівень інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт, а їх практичне використання утворює передумови для підвищення конкурентоспроможності БПС на ринку підводної техніки.

*Weaknesses.* Складною стороною уведення запропонованих етапів у практичну діяльність проектних організацій є вимога створення єдиного інформаційного простору для всіх учасників процесу розробки, будівництва й експлуатації БПС. Додаткову складність утворює необхідність технічного переоснащення виробництва БПС з-за необхідності впровадження адитивних технологій як прикінцевої стадії процесу створення БПС.

*Opportunities* До основних умов успішного та повномасштабного впровадження запропонованих етапів проектування, побудови та експлуатації БПС слід віднести залучення організацій-розробників систем автоматизованого проектування об'єктів морської техніки. Результатом такої співпраці має бути пакет прикладних програм САПР, який забезпечить максимальну «цифровізацію» процесів проектування, будівництва та експлуатації БПС.

*Threats.* Основною перешкодою у впровадженні запропонованих технологій проектування та будівництва БПС можуть бути високі початкові витрати на розробку єдиного інформаційного простору для всіх учасників процесу їх розробки, будівництва та експлуатації. Крім того, додаткову складність можуть викликати роботи з організації адитивного виробництва елементів БПС, оскільки вони мають виготовлятися з різних конструктивних матеріалів.

## **8. Висновки**

1. У роботі виконано системний аналіз закономірностей розвитку технологій проектування БПС та сформульовано перспективні напрямки їх удосконалення на основі сучасного інструментарію проектування та забезпечення конкурентоспроможності на ринку морської техніки. При цьому розроблено генезис технологій проектування буксируваних підводних систем як науково-методологічну основу їх подальшого розвитку та залучення новітніх технологій інформаційного забезпечення конструкторських та виробничих робіт.

2. Теоретично обґрунтовано доцільність уведення у проектну практику технології інформаційного моделювання основних режимів БПС на основі системного підходу, BIM-технології як інформаційної підтримки та адитивної технології для виробництва несерійних елементів БПС. Розроблено змістовну частину вказаних технологій, залучення яких у проектну практику забезпечує скорочення загальних витрат фінансових і часових ресурсів та сприяє підвищенню конкурентоспроможності створюваних БПС.

3. Практично доведено ефективність та промислову перспективність запропонованих технологій створення БПС шляхом їх часткового впровадження у проектну та виробничу практику при створенні БПС проекту «Глайдер». Так, застосування 3D-технології проектування у проекті забезпечило зниження витрат часу конструкторів в межах 25–30 % у порівнянні з традиційною технологією 2D-проектування.

Застосування адитивних технологій для виробництва легкого корпусу БПА знизило витрати часу на його виготовлення у 15–20 разів у порівнянні з традиційною технологією ручного виготовлення матриць та їх обклеювання склопластиком. При цьому, собівартість виконаних виробничих робіт знизилась у 12–15 разів.



## References

1. Moore, S. W., Bohm, H., Jensen, V. (2010). *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*. Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 770.
2. Ryzhkov, S. S., Blintsov, V. S., Yehorov, H. V., Zhukov, Yu. D., Kvasnytskyi, V. F., Koshkin, K. V. et. al. (2011). *Stvorennia universalnykh transportnykh suden i zasobiv okeanotekhniki*. Mykolaiv: Natsionalnyi universytet korablebuduvannia imeni admirala Makarova, 340.
3. *Towed Vehicles*. *The Woods Hole Oceanographic Institution*. Available at: <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/towed-vehicles/>
4. Zraev, R. A. (2016). Tekhnika pokorennia morskikh glubin. Neobitaemye podvodnye apparaty vchera, segodnia i zavtra. *Molodoi uchenii*, 26 (130), 37–39.
5. Iievlev, M. M., Chubenko, O. V., Blintsov, V. S., Nadtochyi, A. V. (2019). *Pidvodna arkhologiiia pivnichnoho Prychornomia: Stan ta perspektyvy rozvytku*. Mykolaiv: Natsionalnyi universytet korablebuduvannia imeni admirala Makarova, 336.
6. Jaulin, L., Caiti, A., Carreras, M., Creuze, V., Plumet, F., Zerr, B., Billon-Coat, A. (2017). *Marine Robotics and Applications*. Springer, 178. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-70724-2>
7. Rimskii-Korsakov, N. A. (2017). Tekhnicheskie sredstva dlia issledovaniia dna akvatorii gidrolokatsionnymi metodami. *Mezhdunarodnii zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniia*, 10 (2), 205–213.
8. Shcherbakov, V. (2013). Lazery ishchut miny. *Obozrenie armii i flota*, 3. Available at: <http://otvaga2004.ru/atrina/atrina-ships/lazery-ishhut-miny/>
9. Burunina, Zh. Yu. (2003). Proektni zadachi mekhaniky pidvodnykh buksyrovanykh system z pidiomnymi aparatamy. *Zbirnyk naukovykh prats UDMTU*, 2 (388), 10–19.
10. Blintsov, V., Maidaniuk, P., Sirivchuk, A. (2019). Improvement of technical supply of projects of robotized monitoring of underwater conditions in shallow water areas. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>
11. Babkin, H. V., Blintsov, V. S., Druzhynin, Ye. A., Kiiko, S. H., Knyrik, N. R., Koshkin, K. V. et. al. (2017). *Upravlinnia uspishnykh proektamy stvorennia skladnoi tekhniki*. Mykolaiv: Vydavnytstvo Torubary V. V., 336.
12. Nekrasov, V. (2019). *Conceptual Designins of Ships*. Kyiv-Kherson: Oldi-Plus, 112.
13. Linklater, A. (2005). *Design and Simulation of a Towed Underwater Vehicle*. Blacksburg, 120. Available at: [https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/33622/Amy\\_Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/33622/Amy_Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
14. Abdulin, A. J., Senyushkin, N. S., Sukhanov, A. V., Yamaliev, R. R. (2010). Systems of the automated designing as the tool of the decision of the high technology problems. *Vestnyk Voronezhskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta*, 10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-kak-instrument-resheniya-naukoemkih-konstruktorskih-zadach-sudostroeniya>
15. Gianpaolo, S., Gianmaria, C., Meneghello, R., D'Angelo, L. (2012). *Computer Aided Ship Design: A new Tools Suite for Management, Tracing, Unfolding and Nesting of Shells*. Conference: 2 Congresso Nazionale del Coordinamento della Meccanica Italiana. Ancona. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/232957836>
16. Sunde, C. H. (2014). *3D visualization of autonomous underwater robots*. Available at: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/238901>
17. Chin, C. S. (2017). *Computer-Aided Control Systems Design: Practical Applications Using MATLAB® and Simulink®*. CRC Press, 384. doi: <http://doi.org/10.1201/b13697>
18. Shahrieel, M., Shahrieel, M. M. A., Li, K., Aripin, K. (2019). Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 48 (7), 1081–1090.
19. Rychenkova, A. Y., Klimenko, E. S., Borodina, L. N. (2020). Geometric modeling and quality assessment of the hull frame surface in COMPASS-3D CAD. *Russian Journal of Water Transport*, 62, 81–90. doi: <http://doi.org/10.37890/jwt.vi62.49>

20. Klimenko, E. S., Borodina, L. N., Rychenkova, A. IU. (2018). Prikladnoe ispolzovanie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniia pri modelirovanii mekhanizmov i mashin na morskome transporte. *Vestnik VGAVT*, 57, 38–44.
21. CAE – Computer-aided engineering. Available at: <https://roi4cio.com/categories/category/cae-sistema-inzhenernogo-analiza/>
22. Minchenko, L. V., Kandratova, T. A. (2017). Sistemy avtomaticheskogo proektirovaniia v sudostroenii. *Sovremennye tendentsii tekhnicheskikh nauk*. Kazan: Buk, 73–76. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/230/12335/>
23. Blintsov, V. S., Burunina, Zh. Yu., Lonh, N. T. (2005). Prohramno-tekhnichnyi kompleks dlia morskikh doslidnytskykh vyprobuvan odnolankovykh pidvodnykh buksirovanykh system. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 3, 30–38.
24. Blintsov, A. V., Burunina, Zh. Iu., Klimenko, P. G., Chan, T. D. (2012). Spetsializirovannii modeliruiushchii kompleks dlia issledovaniia effektivnosti systemy upravleniia podvodnoi buksiruemoi sistemoi. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 1, 92–97.
25. Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. D C W Industries, 522.
26. Kensek, K. M. (2014). *Building Information Modeling. Pocket Architecture: Technical Designes Series*. Routledge, 285. doi: <http://doi.org/10.4324/9781315797076>
27. Kumar, L. J., Pandey, P. M., Wimpenny, D. I. (Eds.) (2019). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 311. doi: <http://doi.org/10.1007/978-981-13-0305-0>
28. Vanin, V. V., Perevertun, V. V., Nadkernychna, T. O. (2005). *Kompiuterna inzhenerna hrafika v seredovyshchi AutoCAD*. Kyiv: Karavela, 336.
29. Hurko, O. H., Yeromenko, I. F. (2011). *Analiz ta syntezy system avtomatychnoho keruvannia v MATLAB*. Kharkiv: KhNADU, 286.
30. Blintsov, O., Sokolov, V., Kucenko, P. (2019). Formulation of design tasks of towed underwater vehicles creation for shallow water and automation of their motion control. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 30–42. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00854>
31. Stankov, B. N., Pecheniuk, A. V. (2015). Tsifrovye tekhnologii v proektirovanii sudov: ispolzovanie kompleksa FlowVision. *SAPR i grafika*, 3, 78–82. Available at: <http://www.digitalmarine.net/builder/SAPR.pdf>
32. Pantov, E. N., Makhin, N. N., Sheremetov, B. B. (1973). *Osnovy teorii dvizheniia podvodnykh apparatov*. Leningrad: Sudostroenie, 216.
33. Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Norway: John Wiley & Sons Ltd., 596. doi: <http://doi.org/10.1002/9781119994138>
34. Blintsov, O. (2017). Devising a method for maintaining manageability at multidimensional automated control of tethered underwater vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (9 (85)), 4–16. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93291>
35. Blintsov, V., Blintsov, O., Sokolov, V. (2019). Synthesis of towed underwater vehicle spatial motion automatic control system under uncertainty conditions. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (2 (45)), 44–51. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.158903>
36. Dudykevych, V., Oleksandr, B. (2016). Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 25–36. doi:10.21303/2461-4262.2016.00158
37. Larsson, L., Visonneau, F., Stern, M. (2011). CFD in ship hydrodynamics – results of the Gothenburg 2010 workshop. *Proc. of the IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, 237–259. doi: [http://doi.org/10.1007/978-94-007-6143-8\\_14](http://doi.org/10.1007/978-94-007-6143-8_14)
38. Blintsov, V., Kucenko, P. (2019). Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (101)), 15–24. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179486>