

DOI: 10.20535/kpissn.2021.3.243586

УДК 629.127+629.7.02+533.69

Н.І. Бурау, С.М. Величко, С.О. Гуриченко*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: stas_gurychenko@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ АУТОНОМНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА ЗА ПРОСТОГО РУХУ

Received: 1 Nov. 2021. Accepted: 7 Dec. 2021.

Проблематика. Створення безпілотних підводних апаратів (БПА) належить до найбільш пріоритетних напрямів морської робототехніки. На різних етапах розроблення БПА застосовують розрахунки та дослідження на основі методів чисельного аналізу та імітаційного моделювання. Для спрощення досліджень доцільно використовувати послідовно чисельне комп'ютерне моделювання за допомогою спеціалізованих програм (CAD), а також гідродинамічне моделювання (CAE).

Мета дослідження. Виконати моделювання конструкцій автономного безпілотного підводного апарата (АБПА) торпедоподібної форми класу мініапаратів масою від 20 до 100 кг та проаналізувати вплив особливостей конструкції АБПА на характеристики обтікання за простого рівномірного прямолінійного руху.

Методика реалізації. У програмному середовищі "Solidworks" виконувалось моделювання конструкції та зовнішнього вигляду чотирьох АБПА, що відрізняються геометричною формою та наявністю чи відсутністю додаткових конструктивних елементів. Побудовані моделі АБПА імпортувалися до програмного пакета "ANSYS Workbench", в якому виконувалось моделювання простого прямолінійного рівномірного руху АБПА у морському середовищі.

Результати дослідження. Для розроблених чотирьох моделей отримано епюри розподілу швидкості, тиску та кінетичної енергії турбулентності за простого прямолінійного рівномірного руху АБПА у морському середовищі.

Висновки. Визначено вплив геометричної форми та додаткових конструктивних елементів на гідродинамічні характеристики АБПА за простого прямолінійного руху. Порівняльний аналіз результатів дає можливість виділити конструктивну модель АБПА, яку доцільно використовувати для подальших досліджень, зокрема з метою розроблення автоматичної системи керування для маневрового АБПА багаточільового призначення. Показано, що завдяки інтеграції CAD та CAE програмних комплексів суттєво скорочується час дослідження, розробки та проектування апарата.

Ключові слова: безпілотний підводний апарат; автономний безпілотний підводний апарат; комп'ютерне моделювання; чисельне дослідження; обчислювальна гідродинаміка.

Вступ

Досягнення науки та техніки за два останні десятиліття стали підґрунтям суттєвих змін в автоматизації та керуванні рухомими об'єктами, зокрема у створенні робототехнічних комплексів безпілотної техніки. Новітні розробки мікроелектромеханічних засобів вимірювання, технологій штучного інтелекту та робототехніки, алгоритмічних методів підвищення точності засобів автономної навігації широко використовують для створення та постійного вдосконалення наземних і повітряних безпілотних апа-

ратів. Стрімкий розвиток безпілотної техніки для пошукових і глибоководних аварійно-рятувальних робіт, обстеження підводних об'єктів, океанографічних досліджень, моніторингу морського середовища став невіддільною частиною реалізації сучасної світової концепції створення малогабаритних автономних інтелектуалізованих рухомих об'єктів для виконання багаточільових завдань у фізичних середовищах. Як показує огляд в [1], [2], за кордоном створення безпілотних підводних апаратів (БПА) належить до найбільш пріоритетних напрямів морської робототехніки.

Рекомендуємо цитувати цю статтю так: Н.І. Бурау, С.М. Величко, С.О. Гуриченко, "Моделювання динаміки автономного безпілотного підводного апарата за простого руху", *Наукові вісті КПІ*, № 3, с. 64–73, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.243586.

Please cite this article as: N.I. Bouraou, S.M. Velychko, and S.O. Gurychenko, "Dynamics simulation of autonomous unmanned underwater vehicle in simple motion", *KPI Science News*, no. 3, pp. 64–73, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.243586.

Безпілотні підводні апарати можна розділити на два основні класи: неавтономні й автономні. Неавтономні БПА буксируються судном-носієм, рухаються по його траєкторії і за наявності рулів можуть маневрувати у вертикальній і (або) горизонтальній площинах [1], [2]. Автономні безпілотні підводні апарати (АБПА) здатні самостійно занурюватися, переміщуватися та спливати за заданою програмою чи за командами телеметрії [2]–[5].

За наведеними в [6] даними, обсяг світового ринку АБПА за період із 2012 до 2020 рр. оцінюють у розмірі 3,2 млрд доларів, а зростання загальної кількості БПА у 2019 р. прогнозували вдвічі проти 2012 р. Це свідчить про стрімкий розвиток наукових досліджень і розробок зі створення та вдосконалення АБПА та їх систем. Удосконалення таких апаратів відбувається за напрямками уніфікації та модульності; мініатюризації й інтелектуалізації; розробки ефективних методів і засобів навігації, орієнтації та керування в разі невизначеності та неповної чи непевної інформації про довкілля; комплексування; інтелектуального керування [2], [7]. Створення АБПА, що відповідають зазначеним тенденціям, є важливим завданням, яке об'єднує теоретичні та практичні дослідження в робототехніці, електроніці, приладобудуванні, інформаційних технологіях.

Останнім часом інтенсивно розвиваються АБПА для прихованих місій [6], що потребують підвищеної автономності та малої гідроакустичної помітності, високої маневровості та значної дальності ходу. Для таких апаратів характерними є складні траєкторії руху, нестационарність взаємодії з фізичним середовищем експлуатації, неповнота контролю зовнішніх впливів, варіації умов і режимів функціонування, складність або неможливість використання зовнішніх засобів для неперервного оперативного контролю позиціонування. Розроблення таких АБПА ґрунтується на поєднанні елементів мініатюризації й інтелектуалізації, ефективних методів і засобів навігації, орієнтації та керування в разі неповної чи непевної інформації.

Під час проектування та розроблення багатопільових АБПА складно обрати як конструкцію апарата, так і методи, алгоритми та засоби автономного позиціонування, оцінювання параметрів руху, керування для забезпечення прийнятної ефективності функціонування таких об'єктів. Натурні дослідження та випробування кожної обраної конструктивної схеми, зміни зовнішнього вигляду апарата, а також досліджен-

ня способів й алгоритмів керування вимагають значних витрат, тому на різних етапах розроблення АБПА застосовують розрахунки та дослідження на основі методів чисельного аналізу й імітаційного моделювання. Ці дослідження важливі для кожної обраної конструктивної схеми апарата, наприклад, для розрахунку гідродинамічних коефіцієнтів, які входять до рівнянь та алгоритмів керування [8], [9].

Зазвичай, для обраного типу апарата розробляють математичну модель (систему диференціальних рівнянь), яка описує просторовий рух апарата з урахуванням коефіцієнтів, що залежать від конструкції та геометрії апарата, умов і режимів його руху та від середовища функціонування та експлуатації [8], [9]. Складність дослідження такої математичної моделі зумовлена необхідністю робити припущення, спрощення та уточнення математичної моделі щоразу після внесення змін до конструкції чи геометрії апарата та типу його руху [8]–[12]. Для спрощення досліджень доцільно використовувати послідовно комп'ютерне тривимірне (3D) моделювання конструкції та геометрії апарата (CAD – Computer-aided design) і гідродинамічне моделювання (CAE CFD modelling – Computer-aided engineering computational fluid dynamics modelling) [10], [13], [14].

Постановка задачі

Виконати моделювання конструкцій АБПА торпедоподібної форми класу мініапаратів масою від 20 до 100 кг [2] та проаналізувати вплив особливостей конструкції АБПА на характеристики обтікання за простого прямолінійного руху.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є тривимірна модель АБПА, яка за масогабаритними характеристиками належить до класу мініапаратів, а за конструктивною схемою – до конструкцій торпедоподібної форми [2]. Розроблено та досліджено чотири моделі АБПА, що відрізняються геометричною формою, а саме значенням радіуса округлення та наявністю чи відсутністю додаткових конструктивних елементів (гідродинамічних стабілізаторів). Розміри досліджуваних моделей наведено в табл. 1. Розробка та моделювання конструкції апарата проводилася у системі автоматизованого проектування Solidworks фірми Dassault Systems [9], [13] – [15].

Таблиця 1. Основні розміри досліджуваних моделей АБПА

	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4
Довжина, мм	1000	1000	1000	1000
Діаметр, мм	300	300	240	240
Радіус округлення, мм	291,75	291,75	500	500
Довжина крила, м	–	100	–	100

Для спрощення розрахунків тривимірні моделі побудовано як звичайні тверді тіла за такими методиками.

Для моделей без додаткових конструктивних елементів:

1) створюють ескіз, який показує бажану форму апарата;

2) будують тривимірну тверду модель обертання, що відображає конструктивну схему торпедоподібної форми без додаткових елементів;

Для моделей із додатковими конструктивними елементами:

1) створюють ескіз, який показує бажану форму апарата;

2) будують тривимірну тверду модель обертання, що відображає конструктивну схему торпедоподібної форми без додаткових елементів;

3) формують додаткову площину, в якій створюють ескіз додаткового елемента (крила);

4) будують крило з використанням інструмента “Extruded Boss/Base”;

5) генерують чотири рівновіддалених елемента з використанням інструмента “Коловий масив”.

Ескізи та тривимірні моделі АБПА наведено на рис. 1 і 2.

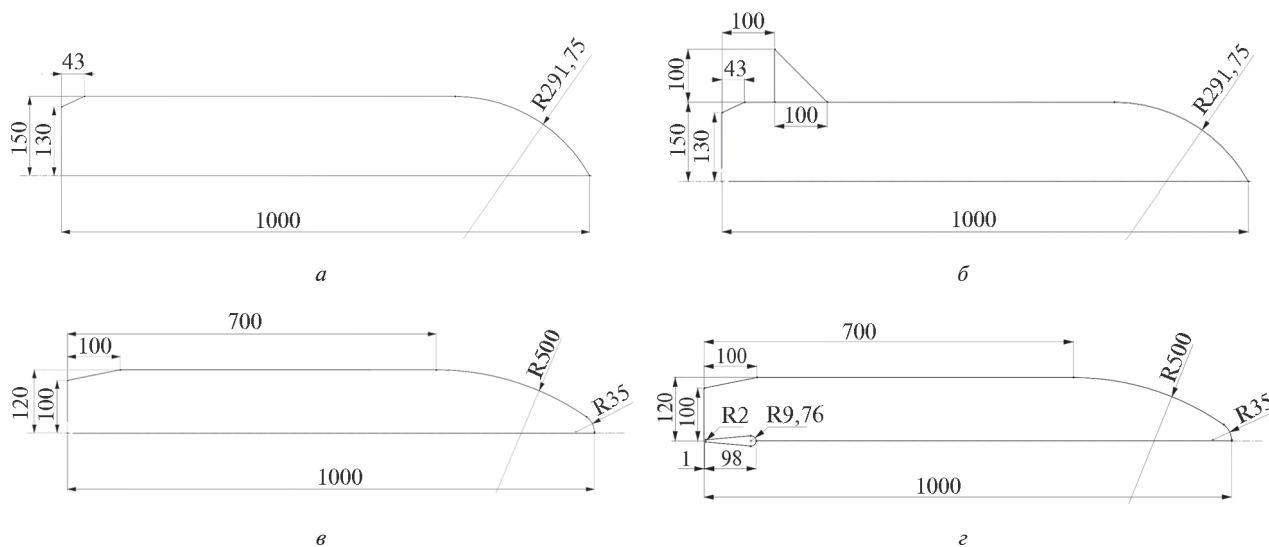


Рис. 1. Ескізи для побудови досліджуваних моделей: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3; г – модель № 4

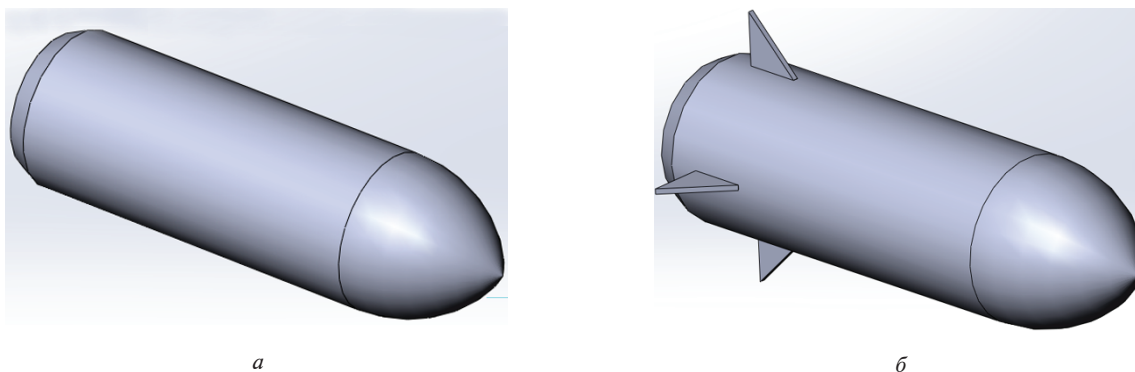


Рис. 2. Ізометричний вигляд побудованих досліджуваних моделей: а – модель № 1; б – модель № 2;

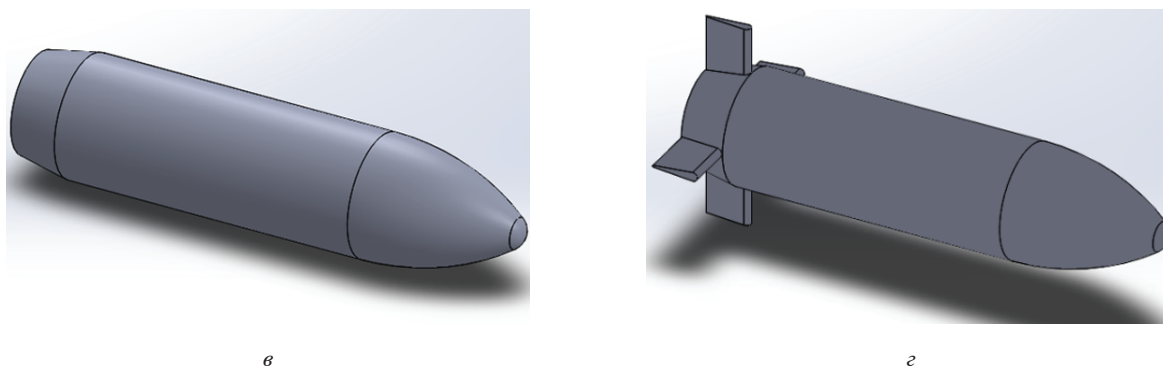


Рис. 2. Ізометричний вигляд побудованих досліджуваних моделей: а – модель № 3; б – модель № 4

Побудовані моделі АБПА було імпортовано до програмного пакета “ANSYS Workbench”, в якому проведено дослідження з імітуванням простого (прямолінійного та рівномірного) руху апарата та визначено вплив кожної конструкції на гідродинамічні характеристики.

Комп’ютерне моделювання та дослідження простого руху АБПА

Комп’ютерне імітаційне моделювання та чисельне гідродинамічне дослідження АБПА проведено у спеціалізованому програмному забезпеченні для комп’ютеризованих і чисельних інженерних досліджень і розрахунків “ANSYS Workbench” модуль “Fluid Flow (CFX)” [15]–[17]. Це програмне забезпечення дає змогу робити складні розрахунки та подавати проекти як взаємопов’язані блок-схеми.

Моделюється простий прямолінійний рівномірний рух АБПА у морському середовищі зі швидкістю 5 вуз (2,572 м/с). Метою моделювання є проаналізувати вплив особливостей конструкції на характеристики обтікання: швидкість, тиск і турбулентність.

Розрахунки у програмному середовищі “ANSYS Workbench” модуль “Fluid Flow (CFX)” проведено в такій послідовності.

1. *Підготовка й імпортування геометрії 3D-моделі.* Контур моделі буде поміщено всередину прямокутної області розміром 8×2 м. Результат підготовки на прикладі моделі № 1 наведено на рис. 3 (результати підготовки до розрахунку для решти моделей є подібними до наведеного для моделі № 1):

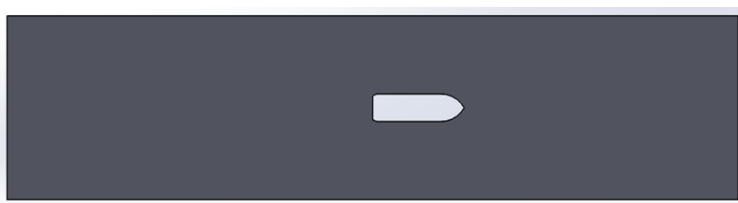


Рис. 3. Підготовлена до розрахунку й аналізу модель № 1

2. *Генерування скінченно-різницевих елементів.* Після підготовки, імпортування та визначення робочої області моделей її розкладають на відповідну кількість скінченно-різницевих елементів, щоб згенерувати сітку для досягнення бажаної точності результатів дослідження та моделювання. Створена сітка складається із чотиригранних елементів з опцією підвищення якості й апроксимацією кривини з обмеженням мінімального розміру, а кількість скінченних елементів у середньому для всіх моделей становить приблизно 2 444 000 од., що достатньо для отримання точного результату.

Додатково було присвоєно назви відповідним граням для зручності користування та проведення подальших операцій. Грані робочої області мають такі назви: “Inlet”, “Outlet”, “Symmetry”, “Model”, “Top” і “Bottom” (рис. 4):

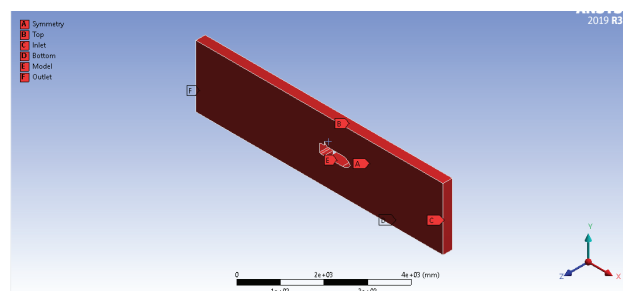


Рис. 4. Назви граней і створена сітка на прикладі моделі № 2

3. *Додавання матеріалу середовища.* Для забезпечення коректного результату та наближення чисельного дослідження до натурального експерименту необхідно визначити середовище, в якому функціонує апарат. Таким середовищем є морська вода. Додавання матеріалу середовища відбувається відповідно до вкладок, де формується група, до якої належить матеріал середовища та його фізичні властивості та характеристики.

4. *Задання граничних умов (ГУ).* Після генерування сітки та формування середовища необхідно визначити ГУ та їх типи.

Гранична умова на вході “Inlet” задає векторну швидкість “Normal Speed” у десятковому форматі відповідної розмірності або як функцію “Cart. Vel. Components” (задання швидкості в декартових координатах, значення яких можуть бути як додатними, так і від’ємними, залежно від напрямку руху). Для моделювання задана швидкість уздовж поздовжньої осі X (швидкість руху) становить 5 вуз, що відповідає простому прямолінійному та рівномірному руху апарата.

Налаштування ГУ на виході “Outlet” відповідає налаштуванню ГУ “Inlet”, окрім параметра “Average Static Pressure”, який було встановлено як 0 Па.

Гранична умова “Symmetry” відповідає за встановлення руху сітки, який у цьому дослідженні визначений за замовчуванням і не змінювався.

Гранична умова “Model” (системне ім’я “Wall”) встановлює значення швидкості біля стінок робочої області, тобто пов’язує між собою тверду та рідку області. Для моделювання було застосовано ГУ “No Slip Wall” – без ковзання стінки, тобто рідина біля стінки набуває швидкості стінки та дорівнює нулю.

Граничні умови “Top” і “Bottom” використовують для задання умов, які відповідають за стан середовища зверху та знизу моделі. Для моделювання задано ГУ відкритого тиску “Opening Pressure – 0 Pa”.

Зображення ГУ показано на рис. 5:

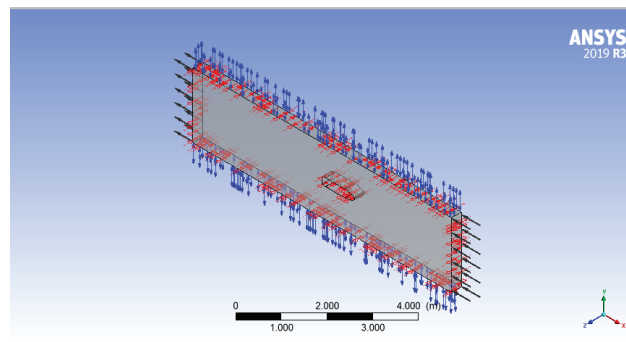


Рис. 5. Зображення граничних умов на моделі

5. *Розрахунок.* Після задання ГУ можна проводити розрахунок, який запускається виконанням команди “CFX-Solver Manager” із вкладки “Solution”. Вікно проведення розрахунків наведено на рис. 6.

6. *Показ та інтерпретація результатів.* Після завершення розрахунку з’являється можливість перегляду результатів за допомогою модуля “CFX-Post”. У ньому інструментом “Contour” показуємо результати як епюр, для цього по чергово завантажуюмо обрані результати дослідження: “Velocity”, “Pressure & Turbulence Kinetic Energy”.

На рис. 7–9 наведено епюри розподілу швидкості, тиску та кінетичної енергії турбулентності, отримані для розроблених чотирьох моделей.

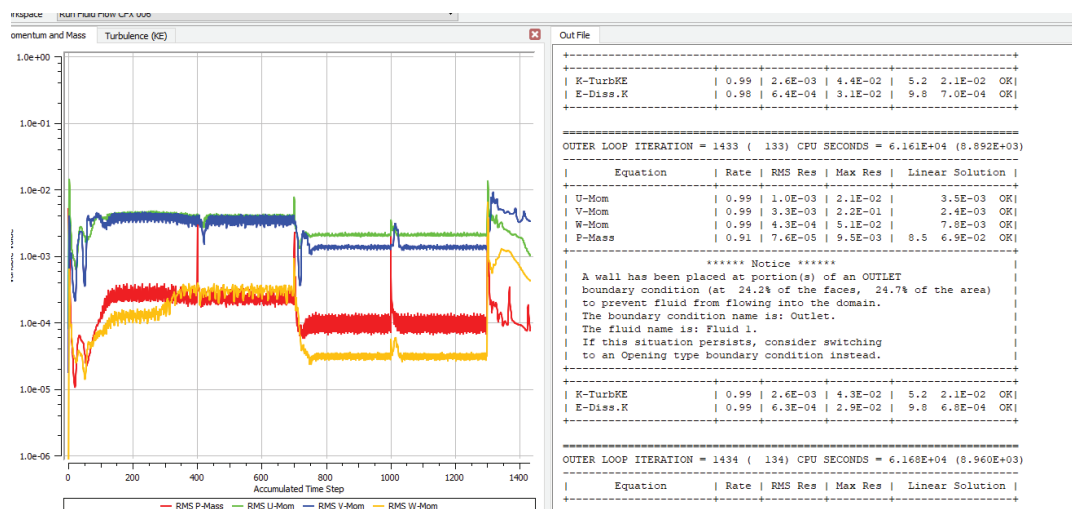


Рис. 6. Видгляд вікна “CFX-Solver Manager” під час розрахунку

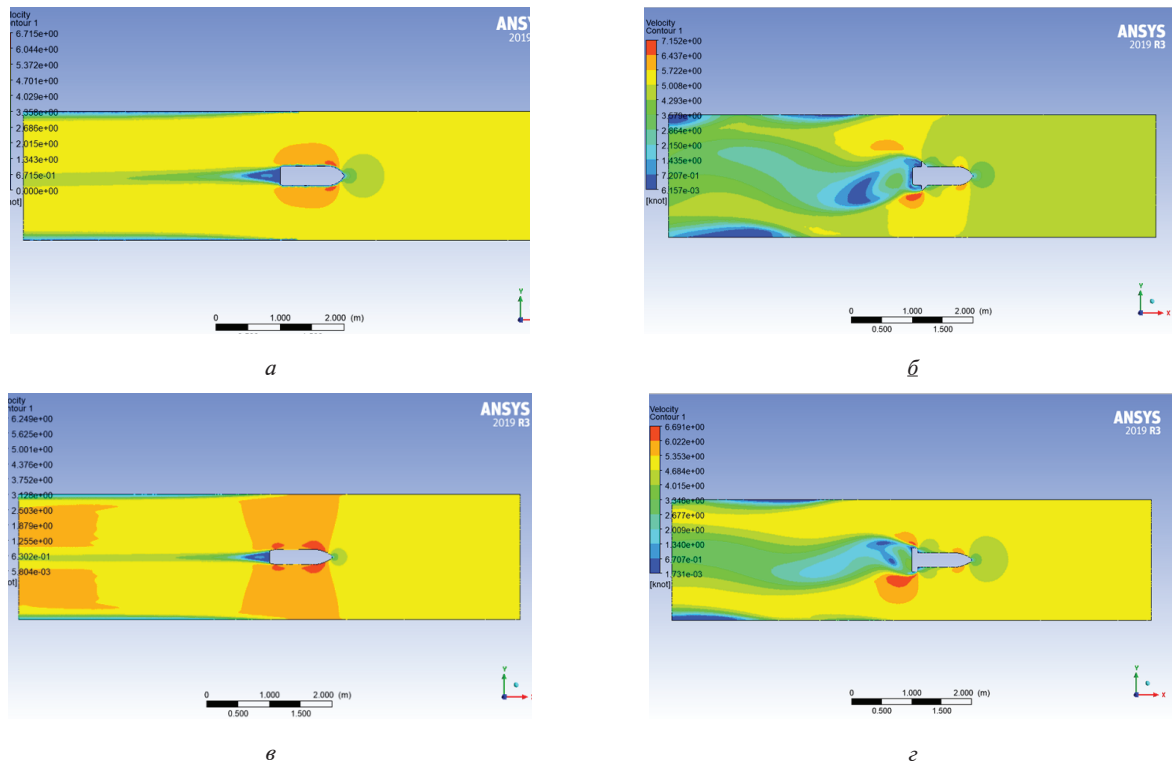


Рис. 7. Епюри розподілу швидкості при дослідженні моделей: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3; з – модель № 4

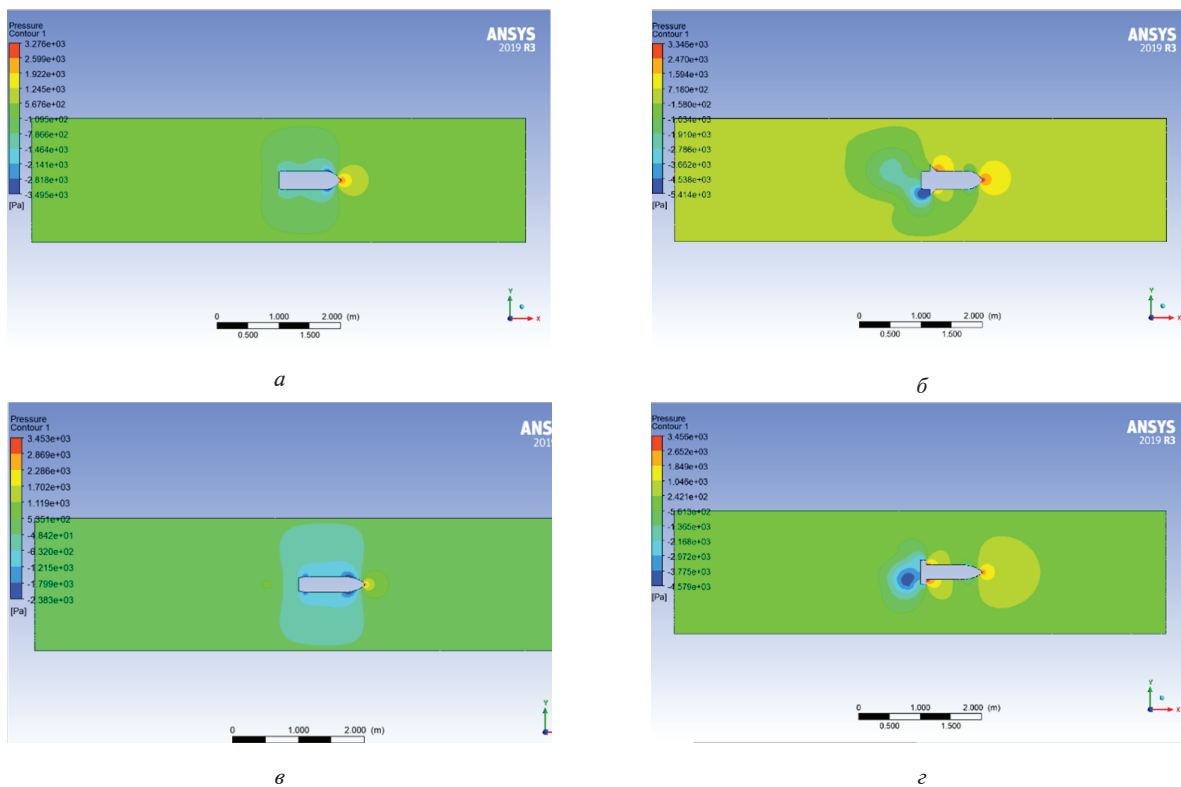


Рис. 8. Епюри розподілу тиску при дослідженні моделей: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3; з – модель № 4

Як видно з наведених на рис. 7 результатів, для моделей № 1 і 3 спостерігається постійний залишковий слід швидкості. Тобто обтічна поверхня має гідродинамічну форму з відносно малим лобовим опором, що важливо для прямолінійного руху та зміни глибини. Для моделей № 2 та 4 спостерігається відрив граничного шару й утворення вихрового сліду швидкості чи вихрової доріжки Кармана. Вихровий слід має коливальний характер і зазвичай таке явище не є бажаним, однак у цьому випадку воно впливає на маневровість апарата. Тож моделі № 2 та 4 можуть бути маневровнішими, ніж моделі № 1 і 3.

Епюри розподілу тиску на рис. 8 показують, що для моделей № 1 і 3 у хвостовій частині утворюється мінімальна зона зниженого тиску, але у верхній і нижній частинах зона зниженого тиску ширша, що позитивно впливає на зміну

глибини. Для моделей № 2 та 4 у хвостовій частині утворюється ширша, як порівняти з моделями № 1 і 3, зона зниженого тиску, що дає більшу маневровість під час руху в горизонтальній площині, тобто за розвороту, зміни курсу тощо.

Епюри, наведені на рис. 9, демонструють розподіл кінетичної енергії турбулентності. Для моделей № 1 і 3 турбулентність утворюється позаду об'єкта, що свідчить про стійкий потік швидкості. Для моделей № 2 та 4 турбулентність утворюється в широкій зоні, що свідчить про зміну швидкості в цих зонах й утворення вихрових доріжок (як і на рис. 7), що збільшує маневровість об'єкта.

У табл. 2 наведено мінімальні та максимальні значення швидкості, тиску та кінетичної енергії турбулентності, отримані внаслідок моделювання.

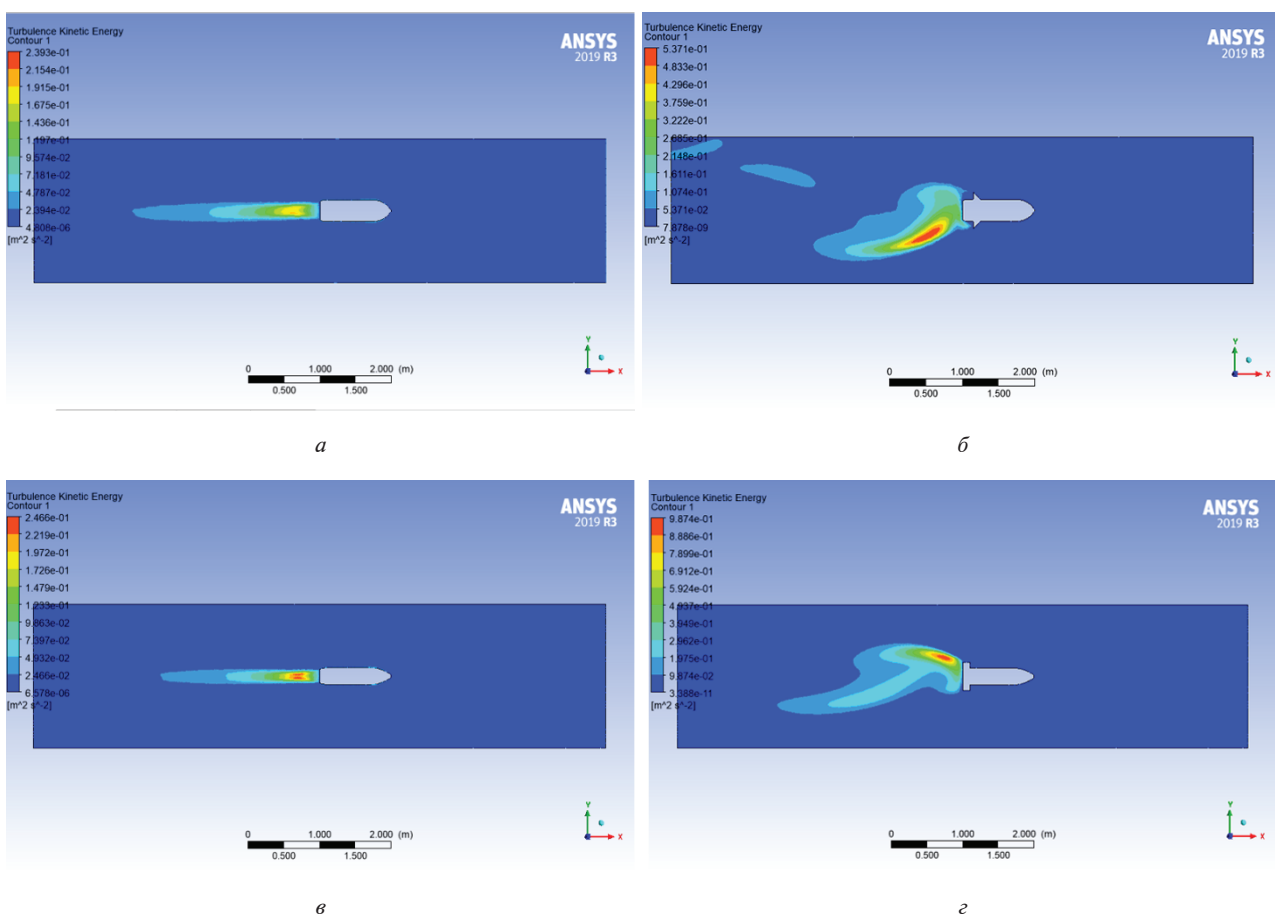


Рис. 9. Епюри розподілу кінетичної енергії турбулентності: а – модель № 1; б – модель № 2; в – модель № 3; з – модель № 4

Таблиця 2. Результати моделювання динаміки АБПА при простому русі

Тип моделі	Значення	Розподілення швидкості, вуз	Тиск, Па	Кінетична енергія турбулентності, м ² /с ²
Модель № 1	Мінімальне	0	-3,495·10 ³	4,808·10 ⁻⁶
	Максимальне	6,715	3,276·10 ³	2,393·10 ⁻¹
Модель № 2	Мінімальне	6,157·10 ⁻³	-5,414·10 ³	7,878·10 ⁻⁹
	Максимальне	7,152	3,346·10 ³	5,371·10 ⁻¹
Модель № 3	Мінімальне	5,804·10 ⁻³	-2,383·10 ³	6,578·10 ⁻⁶
	Максимальне	6,249	3,453·10 ³	2,466·10 ⁻¹
Модель № 4	Мінімальне	1,731·10 ⁻³	-4,579·10 ³	3,388·10 ⁻¹¹
	Максимальне	6,691	3,456·10 ³	9,874·10 ⁻¹

Результати моделювання дають змогу оцінити вплив обраної геометрії та конструкції АБПА на їхні гідродинамічні характеристики за простого руху. Порівняльний аналіз результатів дає можливість виділити такі відмінності:

- для моделей № 1 і 3 (без додаткових елементів): модель № 1 має широкую зону розподілу швидкості, максимальне значення швидкості перевищує таке ж значення для моделі № 3 на 7 %; для моделі № 3 значення максимального тиску навколо апарата вище на 5 %, а значення кінетичної енергії турбулентності вище на 3 %, ніж значення цих характеристик для моделі № 1;
- для моделей № 2 та 4 (з додатковими елементами): модель № 2 має на 6 % більше значення максимальної швидкості, ніж модель № 2; для моделі № 4 значення максимального тиску навколо апарата вище на 6 %, а значення кінетичної енергії турбулентності вище на 45 %, ніж значення цих характеристик для моделі № 2.

На основі цих даних можна констатувати, що за показниками геометричної форми та конструкції без додаткових елементів модель № 3 є динамічнішою за модель № 1, тому її доцільно використовувати для подальших досліджень, зокрема з метою розроблення автоматичної системи керування для маневрового АБПА багатопільового призначення. Модель № 4 з додатковими елементами є динамічнішою за модель № 2, проте такий висновок є лише орієнтовним, а для його підтвердження необхідно провести додаткові дослідження цих моделей за різних траєкторій руху. При дослідженні моделей № 2 та 4 спостерігається виникнення вихрових слідів, яке теж потребує визначення впливу на гідродинаміку та рух апарата.

Висновки

Визначено вплив геометричної форми та додаткових конструктивних елементів АБПА торпедоподібної форми класу мініапаратів на гідродинамічні характеристики апарата за простого руху. Порівняльний аналіз отриманих результатів надає можливість виділити модель, яку доцільно використовувати для подальших досліджень, зокрема з метою розроблення автоматичної системи керування для маневрового АБПА багатопільового призначення.

Показано, що інтеграція CAD і CAE – програмних пакетів надає можливість детально відобразити конструкцію та зовнішній вигляд апарата та зімітувати бажаний рух апарата і рух рідини навколо апарата, оцінити опір і сили, що виникають і діють на апарат під час руху і суттєво скоротити час розробки та проектування апарата.

За результатами моделювання та аналізу дві моделі № 3 та 4 однакової геометричної форми, що відрізняються лише відсутністю чи наявністю додаткових елементів (гідродинамічних стабілізаторів), обрано для подальших досліджень динаміки АБПА зі складним рухом. На основі моделювання динаміки апарата для різних, за параметрами та траєкторією, режимів руху запропоновано вдосконалити систему збору та обробки інформації, систему орієнтації та навігації, систему керування рухом та розробити алгоритми адаптивного керування для забезпечення ефективної експлуатації та розширення функціональних можливостей багатопільового маневрового АБПА.

References

- [1] L. Bocharov, "Unmanned underwater vehicles. Their status and general development trends", *Electronics: sci. thechnol. business*, no. 7, pp. 62–69, 2009. Available: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_286_934.pdf.
- [2] N. I. Bouraou, L. L. Yatsko, M. D. Rasulov, and V. S. Bobrik, "Review of the state of modern autonomous unmanned underwater vehicles," *Bull. Eng. Academy Ukraine*, no. 4, pp. 12–17, 2017.
- [3] I. Belousov. "Modern and promising unmanned underwater vehicles of the US Navy", *Foreign military review*, no. 5, pp. 79–88, 2013.
- [4] A. V. Inzartsev, Ed., *Underwater Vehicles*, London, UK, IntechOpen, 2009. doi: 10.5772/107.
- [5] S. A. Gafurov and E. V. Klochkov, "Autonomous unmanned underwater vehicles development tendencies", *Procedia Engr.*, vol. 106. pp. 141–148, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.017.
- [6] A. V. Lopota and A.B. Nikolayev, *Marine robotic systems for military and special purposes*, St. Petersburg, Russia: Central Research Institute of Robotics and Technical Cybernetics, 2016.
- [7] Yu. V. Matvienko, A.V. Inzartsev, L.V. Kiselev, and A.F. Shcherbatyuk, "The prospects for improving efficiency autonomous underwater robots," *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, no. 1(174), pp. 123–140, 2016.
- [8] M. D. Ageev *et al.*, *Autonomous underwater robots: systems and technology*, M. D. Ageev and L. V. Kiselev, Eds., Moscow, Russia, Nauka, 2005.
- [9] Y. A. Lukomsky and V. S. Chugunov, *Marine mobile objects control systems: Textbook*, Leningrad, Russia, Sudostroyeniye, 1988.
- [10] B. V. Gurenko, "Development and research of mathematical model for autonomous underwater vehicle", *Engr. J. of Don*, no. 4, 2014. [Online]. Available: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2626>.
- [11] N. D. Svishchev and A.V. Rybakov, "Intellectual control of underwater robot based on artificial neural network", *Caspian journal: management and high technologies*, no. 4, pp. 103–119, 2018. Available: [https://hi-tech.asu.edu.ru/files/4\(44\)/103-119.pdf](https://hi-tech.asu.edu.ru/files/4(44)/103-119.pdf).
- [12] E. N. Pantov, N. N. Makhinin, and B.B. Sheremetov, *Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles*, Leningrad, Russia, Sudostroyeniye, 1973.
- [13] M. S. M. Aras *et al.*, "Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD," *Indian J. Geo-Marine Sci.*, vol. 48, pp. 1081–1090, 2019.
- [14] M. A. Wahed and M.R. Arshad, "Modeling of torpedo-shaped micro autonomous underwater vehicle," in *10th Int. Conf. Robotics, Vision, Signal Processing Power Applications*, Singapore, 2019, pp. 457–463. doi: 10.1007/978-981-13-6447-1_58.
- [15] M. Lombard, *SolidWorks 2013 Bible*, Wiley, 2013.
- [16] K. Alam, T. Ray, and S. G. Anavatti, "Design optimization of an unmanned underwater vehicle using low-and high-fidelity models," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.: Syst.*, vol. 47, no. 11, pp. 2794–2808, Nov. 2017. doi: 10.1109/TSMC.2015.2390592.
- [17] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 20, no. 6, pp. 1475–1483, 1990. doi: 10.1109/21.61218.

Н.И. Бурай, С.Н. Величко, С.О. Гуриченко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОНОМНОГО БЕСПИЛОТНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОСТОМ ДВИЖЕНИИ

Проблематика. Создание беспилотных подводных аппаратов (БПА) является одним из наиболее приоритетных направлений морской робототехники. На различных этапах разработки БПА используют расчеты и исследования на основе методов численного анализа и имитационного моделирования. Для упрощения исследований целесообразно использовать последовательное численное компьютерное моделирование с помощью специализированных программ (CAD), а также гидродинамическое моделирование (CAE).

Цель исследования. Выполнить моделирование конструкций автономного беспилотного подводного аппарата (АБПА) торпедообразной формы класса миниаппаратов массой от 20 до 100 кг и проанализировать влияние особенностей конструкции АБПА на характеристики обтекания при простом равномерном прямолинейном движении.

Методика реализации. В программной среде "Solidworks" выполнялось моделирование конструкции и внешнего вида четырех АБПА, отличающихся геометрической формой и наличием или отсутствием дополнительных конструктивных элементов. Построенные модели АБПА импортировались в программный пакет "ANSYS Workbench", в котором выполнялось моделирование простого прямолинейного равномерного движения АБПА в морской среде.

Результаты исследования. Для разработанных четырех моделей получены эпюры распределения скорости, давления и кинетической энергии турбулентности при простом прямолинейном равномерном движении АБПА в морской среде.

Выводы. Определено влияние геометрической формы и дополнительных конструктивных элементов на гидродинамические характеристики АБПА при простом прямолинейном движении. Сравнительный анализ результатов позволяет выделить конструктивную модель АБПА, которую целесообразно использовать для дальнейших исследований, в частности с целью разработки автоматической системы управления для маневрового АБПА многоцелевого назначения. Показано, что благодаря интеграции CAD и CAE программных комплексов значительно сокращается время исследования, разработки и проектирования аппарата.

Ключевые слова: беспилотный подводный аппарат; автономный беспилотный подводный аппарат; компьютерное моделирование; численное исследование; вычислительная гидродинамика.

N.I. Bouraou, S.M. Velychko, S.O. Guryenko

DYNAMICS SIMULATION OF AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE IN SIMPLE MOTION

Background. The creation of unmanned underwater vehicles (UUVs) is one of the highest priority areas of marine robotics. Calculations and research based on methods of numerical analysis and simulation are used at different stages of UUV development. To simplify research, it is rational to use sequential numerical computer modelling using specialized programs (CAD), as well as hydrodynamic simulation (CAE).

Objective. The purpose of the paper is to perform modelling of the torpedo-shaped design of autonomous unmanned underwater vehicles (AUUVs) of the class of mini-apparatus weighing from 20 kg to 100 kg and analyse the influence of the design features of the AUUVs on the hydrodynamic characteristics in simple uniform rectilinear motion.

Methods. Modelling of the design and appearance of four AUUVs (which differ in geometry and the presence of additional structural elements) was performed in the software environment "Solidworks". The developed AUUVs models were imported into the software package "ANSYS Workbench", in which the simulation of simple rectilinear uniform motion of AUUVs in the sea environment was performed.

Results. For the developed four models, diagrams of the velocity distribution, pressure and kinetic energy of turbulence with simple rectilinear uniform motion of AUUVs in the sea environment were obtained.

Conclusions. The influence of geometric shape and additional design elements on the hydrodynamic characteristics of AUUV with simple rectilinear motion is determined. Comparative analysis of the results makes it possible to identify a design model of AUUV, which should be used for further research, in particular to develop an automatic control system for manoeuvrable multi-purpose AUUV. It is shown that due to the integration of CAD and CAE software the time of research, development and design of the apparatus is significantly reduced.

Keywords: unmanned underwater vehicle; autonomous unmanned underwater vehicle; computer simulation; numerical research; computational fluid dynamics (CFD).

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
1 листопада 2021 року

Прийнята до публікації
7 грудня 2021 року