



**Hanna S.
Hrudinina**
Грудініна
Ганна Сергіївна

УДК 681.5:629.58

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELLING TO SPECIFY THE VALUE OF PROPULSION RESISTANCE IN AN OBLIQUE FLOW

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ ЗНАЧЕННЯ УПОРУ РУШІЯ В КОСОМУ ПОТОЦІ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).07](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).07)

Hanna S. Hrudinina

Грудініна Ганна Сергіївна,
канд. техн. наук, старший викладач
hanna.hrudinina@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8298-9251

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. The purpose of the work is to obtain a precise value of the thrust of the propulsion and steering devices when working in an oblique flow of water by means of mathematical modelling.

A study of the hydrodynamic parameters of the propulsion and steering device of an autonomous unmanned underwater vehicle was carried out using the method of mathematical modelling. The dependences of the thrust of propulsion devices such as a propeller in a rotary nozzle and a rotary screw column when working in an oblique water flow were obtained. The paper proposes a combination of two research methods: modelling the operation of thrusters in an oblique flow using a mathematical model implemented in the Simulink Matlab system and calculating the hydrodynamic parameters of the propulsion device using Flow Vision.

By simulating the motion of an autonomous unmanned underwater vehicle, it was established that with an increase in the angle of attack of the flow, the thrust of the engine and, accordingly, the speed of the vehicle decreases significantly. For a rotary screw column, due to the use of a directional nozzle, there is an increase in the resistance in a certain range of angles of attack of the flow.

According to the simulation results, a sample of data was obtained, which in the form of a three-dimensional matrix describes the dependence of the deviation of the thrust stop on the angle and speed of the water flow.

As a result of the numerical calculation, the following parameters were obtained: coaxial thrust force of the screw-drive-nozzle complex PN160-1; required power supplied to the propeller PN160-1; lateral force on the PN160-1 engine; total stop of the PN160-2 engine; total lateral force on the PN160-2 engine; power is required to rotate the PN160-2 propeller. Each obtained curve corresponds to the set speed and angle of attack of the flow: $v = [1; 2; 3] \text{ m/s}$, $\delta = [0; 10; 20; 30]^\circ$.

The data sample formed in vector form was used to train a neural network as part of the automatic speed control system of the underwater vehicle. The proposed research approach is convenient to use for obtaining and specifying nonlinear hydrodynamic parameters of autonomous unmanned underwater vehicles of medium and small classes.

Key words: mathematical modelling; propulsion and steering device; computational hydrodynamics; autonomous unmanned underwater vehicle.

Анотація. Метою роботи є отримання уточненого значення упору рушійно-кермових пристроїв у разі роботи в косому потоці води шляхом математичного моделювання.

Методом математичного моделювання проведено дослідження гідродинамічних параметрів рушійно-кермового пристрою автономного ненаселеного підводного апарату. Отримано залежності упору рушійних пристроїв типу гребний гвинт у поворотній насадці та гвинтова поворотна колонка у разі роботи в косому потоці води. В роботі пропонується поєднання двох методів дослідження: моделювання роботи рушіїв у косому потоці з використанням математичної моделі, реалізованої у системі Simulink Matlab, та розрахунків гідродинамічних параметрів рушійного пристрою засобами Flow Vision.

Шляхом імітаційного моделювання руху автономного ненаселеного підводного апарату встановлено, що зі збільшенням кута набігання потоку упор рушія, відповідно, і швидкість руху апарату значно зменшується. Для поворотної гвинтової колонки через застосування прямої насадки спостерігається зростання упору в деякому діапазоні кутів набігання потоку.

За результатами моделювання отримано вибірку даних, що у вигляді тривимірної матриці описує залежність відхилення упору рушія від кута та швидкості набігання потоку води $\Delta F = f(v, \delta)$.

У результаті числового розрахунку отримано такі параметри, як: співвісна сила упору комплексу гвинт-привод-насадка PN160-1; необхідна потужність, що підводиться до гребного гвинта PN160-1; бічна сила на рушії PN160-1; сумарний упор рушія PN160-2; сумарна бічна сила на рушії PN160-2; потужність, необхідна для обертання гребного гвинта PN160-2. Кожна отримана крива відповідає встановленій швидкості та куту набігання потоку: $v = [1; 2; 3]$ м/с, $\delta = [0; 10; 20; 30]^\circ$.

Сформовану у векторному вигляді вибірку даних було використано для навчання нейронної мережі у складі системи автоматичного керування швидкістю руху підводного апарату. Запропонований підхід дослідження зручно використовувати для отримання та уточнення нелінійних гідродинамічних параметрів автономних ненаселених підводних апаратів середнього та малого класів.

Ключові слова: математичне моделювання; рушійно-кермовий пристрій; обчислювальна гідродинаміка; автономний ненаселений підводний апарат.

References

- [1] Abdullah Al Noman. (2019). Performance analysis of an unmanned under water vehicle using CFD technique. AIP Conference Proceedings. DOI: 10.1063/1.5115886.
- [2] Aras M.S.M., Zhe K.L., Aripin M.K., Chaing T.P., Shah H.N.M., Khamis A. & Rashid M.Z.A. (2019). Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD. Indian J. Geo-Marine Sci., vol. 48, pp. 1081–1090.
- [3] Bhat I. Stenius & T. Miao (2021). “Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full 00 – 3600 envelope”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 46, No. 4, 1114–1131. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3076178>.
- [4] Zhu X., Bao-Wei S., Zhi-xiong S. and Peng W. (2012). Hydrodynamic Characteristics Analysis of UUV Parking on the Seabed. Journal of Shanghai Jiaotong University, 4.
- [5] Du X. Wang, H. Hao C. and Li. X. (2014). Analysis of hydrodynamic characteristics of unmanned underwater vehicle moving close to the sea bottom. Def. Technol., 10/1, pp. 76–81.
- [6] Tang M. Zhang, Z. and Xing Y. (2011). Analysis of New Developments and Key Technologies of Autonomous Underwater Vehicle in Marine Survey. Procedia Environmental Sciences, Vol. 10, Part C, pp. 1992–1999.
- [7] Phillips A., Furlong M., and Turnock S.R. (2007). The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle. December 2007. Conference: Nutts.
- [8] Dantas J.L.D. and De Barros E.A. (2013). Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability. Applied Ocean Research, vol. 42, pp. 168–181.
- [9] Vasudev K.L., Sharma R. and Bhattacharyya S.K. (2014). A multi-objective optimization design framework integrated with CFD for the design of AUVs. Methods Oceanogr.
- [10] Esmaeilifar E., Hassan M., and Forouzi B. (2017). Hydrodynamic simulation of an oscillating hydrofoil near free surface in critical unsteady parameter. Ocean Eng., vol. 141, pp. 227–236.
- [11] SOLIDWORKS Flow Simulation. Retrieved from: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation>.

- [12] ANSYS. Retrieved from: <https://www.ansys.com/>.
- [13] ANSYS Fluid Flow. Retrieved from: <https://www.ansys.com/products/fluids>.
- [14] ANSYS Meshing. Retrieved from: <https://simutechgroup.com/why-is-meshing-important-for-fea-fluidsimulations/>
- [15] Gurynenko S.O., Bouraou N.I., Surgok V.O. (2023). Simulation and analysis of the complex movement of an autonomous unmanned underwater vehicle. *Electronic modelling*, 45(3):81–91. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.081>.
- [16] Korol Yu. (2021). Computational Fluid Dynamics Methods for Designing the Propeller-Steering Complex of Submarine. *Modern Environmental Science and Engineering* (ISSN 2333-2581), Volume 7, No. 3, pp. 223–231. DOI: 10.15341/mese(2333-2581)/03.07.2021/005 Academic Star Publishing Company, www.academicstar.us.
- [17] Korol Yu.M. (2019). Metody obchysliuvalnoi hidrodynamiky u zavdannakh proektuvannia rushiino-kermovoho kompleksu pidvodnykh chovniv [Methods of computational hydrodynamics in the tasks of designing the propulsion and steering complex of submarines]. *Materialy vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu «Suchasni tekhnolohii proektuvannia, pobudovy, ekspluatatsii ta remontu suden, morskikh tekhnichnykh zasobiv ta inzhenernykh sporud»*, Mykolaiv.
- [18] Korol Yu.M. (2019). Hidrodinamichniy analiz variantiv rushiino-kermovoho kompleksu pidvodnoho aparata «Suboff» [Hydrodynamic analysis of variants of the propulsion and steering complex of the Suboff underwater vehicle]. *Materialy X mizhnarodnoi tekhnichnoi konferentsii «Innovatsii u sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi»*, Natsionalnyi universytet korablebuduvannia imeni admiral Makarova, Mykolaiv.
- [19] Müller E. (1981). Results of open water tests with ducted and nonducted propellers with angle of attack from 0 to 360 deg. *Polish acad. of sci. hronc. of symposium “Advance in propeller research and design”*, Gdansk.
- [20] Korol Yu.M. ta Brazhko O.S. (2011). Zastosuvannia prohramnoho kompleksu FlowVision dlia vyryshennia zavdan roboty hrebnykh hvyntiv u kosomu pototsi [Application of the FlowVision software complex to solving problems about the operation of propellers in an oblique flow]. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi, materialy II MNTK*, Mykolaiv: NUK.
- [21] Hrudinina H.S. (2018). Mathematical modelling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 2(10), 144–153. DOI: 10.15589/SMI. <http://smi.nuos.mk.ua/-archive/2018/2/16.pdf>.
- [22] Blintsov V.S., Hrudinina H.S., Burunina Zh.Yu., ta Nadtochy A.V. (2022). Rozrobka systemy avtomatychnoho keruvannia shvydkistiu rukhu avtonomnoho nenaselenoho pidvodnoho aparatu [Development of a system of automatic control of the speed of movement of an autonomous unmanned underwater vehicle]. *Zhurnal «Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky»*. Tom 33 (72), № 4, 56–65. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/10>.
- [23] Blintsov V.S., Hrudinina H.S., Korol Yu.M., Nadtochy A.V. (2021). Doslidzhennia roboty rushiino-rulovoho kompleksu pidvodnoho aparata v kosomu pototsi vody metodamy matematychnoho modeliuвання [Study of the operation of the propulsion and steering complex of an underwater vehicle in an oblique water flow using mathematical modelling methods]. *Pidvodna tekhnika i tekhnolohiia, XI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu*, NUK.
- [24] Korol Yu.M., Dudchenko O.N. ta Korneliuk O.N. (2018). Rozrobka ta vykorystannia prohramnoho zabezpechennia dlia multyparmetrychnoi heneratsii 3D modelei hrebnykh hvyntiv [Development and use of software for multi-parametric generation of 3D models of propellers]. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi, materialy MNTK*, Mykolaiv: NUK.
- [25] Korol Yu.M. ta Brazhko O.S. (2012). Metody obchysliuvalnoi hidrodynamiky u problemakh proektuvannia telekerovanykh pidvodnykh aparativ. [Methods of computational hydrodynamics in the design problems of remote-controlled underwater vehicles]. *Materialy MNTK «Inzhenerni systemy 2012»*, Mykolaiv: MNTK.
- [26] Caccia M., Indiveri G., and Veruggio G. (2000). Modelling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, pp. 227–240.
- [27] Alessandri A., Bono R., Caccia M., Indiveri G., and Veruggio G. (1998). Experiences on the modelling and identification of the heave motion of an open-frame UUV, presented at *Oceans Conference Record* (IEEE), Nice, Fr.

- [28] Morrison A.T. and Yoerger D.R. (1993). Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, nonuniform, 1-dimensional translation, Victoria, BC, Canada.
- [29] Talha Gulgun, İsmail Yalçinkaya, Mertcan Erdogan & Akif Stop. (2021). Investigation of the free vibration characteristic of a propeller planned for use in a thruster in an unmanned underwater vehicle. European journal of science and technology. No. 31(Supp. 1), pp. 870–873. DOI: 10.31590/ejosat.1010720.
- [30] Conte G., Zanolli S.M., Scaradozzi D. and Conti A. (2004). Evaluation of hydrodynamics parameters of a UUV. A preliminary study, presented at International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, ISCCSP, Hammamet.
- [31] Boehm J., Berkenpas E., Henning B., Rodriguez M., Shepard C., & Turchik A. (2018). Characterization, modelling, and simulation of an ROV thruster using a six degree-of-freedom load cell. Paper presented at the OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston.
- [32] Egeskov P., Bjerrum A., Pascoal A., Silvestre C., Aage C. and Smitt L.W. (1994). Design, construction and hydrodynamic testing of the AUV MARIUS, Cambridge, MA, USA.
- [33] Aage C. and Smitt L. Wagner. (1994). Hydrodynamic manoeuvrability data of a flatfish type AUV, Brest, France.
- [34] Blintsov S.V. (2014). Teoretychni osnovy avtomatychnoho keruvannia avtonomnymy pidvodnymy aparatamy. Mykolaiv: NUK.

Постановка задачі. Під час створення системи автоматичного керування траєкторним рухом автономного ненаселеного підводного апарата підвищити швидкість відпрацювання помилки керування можна за рахунок використання даних прогнозованої похибки. До зовнішніх збурень, що впливають на динаміку АНПА, належать швидкість та кут набігання потоку води у разі переходу із зони однієї течії в іншу або відхилення потоку, що створюється засобами керування апаратом. Якщо за допомогою зовнішніх датчиків та зворотного зв'язку система керування може мати уявлення про характер зовнішнього збурення, то засобами обчислювальної мережі буде визначено значення сигналу корегування. Для вирішення таких завдань успішно застосовуються засоби штучного інтелекту та нечіткої логіки. Однак для досягнення бажаного результату необхідно мати уявлення про характер впливу на гідродинамічні параметри об'єкта дослідження за різних умов функціонування. Як правило, отримати такі дані можна шляхом експериментальних випробувань, у цьому випадку методом математичного моделювання функціонування рушія в косому потоці води.

У роботі необхідно вирішити такі завдання – провести дослідження та уточнення гідродинамічних параметрів рушійно-кермових пристроїв АНПА у разі роботи в косому

потоці води. З цією метою пропонується поєднання двох методів дослідження: моделювання роботи рушія в косому потоці з використанням математичної моделі АНПА, реалізованої у системі Simulink Matlab, та розрахунок гідродинамічних параметрів рушійного пристрою засобами Flow Vision.

Моделювання провести для найбільш поширених типів рушіїв малого та середнього класу АНПА – гребного гвинта в поворотній насадці і поворотної гвинтової колонки. Як рушійно-кермовий пристрій вибрати модель PN160-1, PN160-2.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

За аналізом публікацій можна відзначити, що безпілотні автономні чи дистанційно керовані підводні апарати набули широкого застосування у морегосподарській діяльності багатьох країн світу.

Очевидно, що для підвищення маневрності такого апарату необхідно проводити дослідження впливу внутрішніх та зовнішніх збурень на динаміку АНПА. Для оцінки та прогнозування гідродинамічних характеристик АНПА в роботах [1–3] пропонується застосування програмного забезпечення Computational Fluid Dynamics (CFD). У роботах наведено переваги числового моделювання порівняно з експериментальним дослідженням, зокрема, застосування комерційних програм для моделювання обчислювальної гідродина-

міки, що робить числове моделювання широко застосованим [4]. Є багато типів моделей, доступних для дослідження турбулентних характеристик рідини. Серед них дуже популярними є RANS (Reynolds Average Navier Stokes), Large Eddy Simulation, Detached Eddy Simulation, різні моделі для визначення напружень Рейнольдса – Spallart Allmaras. Дослідники в усьому світі вибирають різні моделі відповідно до власного експерименту. У роботі [5–6] проаналізували гідродинамічні характеристики UUV під час руху поблизу морського дна та за різних умов функціонування. У моделюванні для аналізу турбулентності потоку використовується SST k -модель із серії RANS. Порівняльний аналіз результатів числового моделювання з використанням елементів суцільного турбулентного потоку, що впливає на АНПА, та натурних випробувань [7–9] вказує на високу ефективність застосування програмних продуктів для отримання гідродинамічних параметрів підводних апаратів, а також елементів керування ними [10; 11].

Програмна система аналізу ANSYS також містить модулі для дослідження гідродинаміки. ANSYS Flow Fluent є передовим програмним продуктом для моделювання гідродинамічних процесів і включає перевірені часом інструменти, які забезпечують швидкі і точні результати для широкого спектра завдань гідродинаміки [12–15].

У роботах [16–18] описано методи визначення коефіцієнтів взаємодії елементів рушійно-кермового пристрою (РКП), що дозволяють обчислити коефіцієнти упору та моменту рушійного пристрою шляхом математичного моделювання, враховуючи одночасну роботу всіх елементів РКП. Такий спосіб дослідження, на думку автора, є набагато якіснішим, дешевшим за натурні випробування та потребує набагато менше часу. Отримані шляхом математичного моделювання дані доцільно використовувати у розробці систем автоматичного керування підвищеної точності.

Використання перелічених програмних продуктів дає широкі можливості з дослідження та прогнозування гідродинамічних характеристик АНПА та їх рушійно-кермових пристроїв за наявності достовірної 3D-моделі об'єкта дослідження.

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Упор рушійно-кермового пристрою (РКП) є головною рушійною силою АНПА. Залежно від конструктивних особливостей рушіїв з гребними гвинтами загальний упор складається з упору гвинта та упору керма, напрямної або поворотної насадки. Такі типи рушіїв широко застосовуються на АНПА малого і середнього класів для забезпечення апаратів необхідною тягою та маневреністю. Очевидно, що для підвищення точності керування такими апаратами необхідно мати більш детальне уявлення про залежність упору рушіїв від зовнішнього впливу, а саме швидкості та кута потоку, що набігає на рушій.

Взагалі, для визначення упору рушіїв було проведено велику кількість експериментальних досліджень з використанням дослідних басейнів та обладнання, але таке дослідження носить досить обмежений за можливостями та собівартістю характер. Однак використання математичної моделі АНПА з відомими параметрами РКП робить таку задачу більш універсальною, доступною для швидкого дослідження параметрів рушіїв того ж класу. Також під час розробки системи автоматичного керування АНПА може виникнути необхідність отримати уточнені дані для окремих діапазонів керування. В таких випадках доцільне застосування програмних продуктів з можливостями поєднання конструктивних параметрів рушіїв та моделей турбулентних потоків рідини, до таких належать програми, описані вище. Також значно розширити можливості дослідження можна з використанням математичних моделей динаміки руху підводних апаратів, реалізованих у системі Simulink Matlab. Таке моделювання досить ефективне для отримання бази даних в інтелектуальних системах керування (для формування навчальної вибірки даних).

Мета дослідження – провести серію експериментів для отримання уточненого значення упору рушійно-кермових пристроїв у разі роботи в косому потоці води шляхом математичного моделювання.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. В основу експериментального дослідження упо-

ру рушійно-кермового пристрою закладено метод, описаний у довіднику А.Д. Гофмана [19], для гребного гвинта в поворотній насадці та для поворотної гвинтової колонки, що проведений у випробувальному басейні. Під час експерименту РКП було встановлено на візок з поворотом насадки на встановлений кут. Візок переміщувався вздовж басейну із заданою швидкістю, а рушій розганяли до заданих обертів двигуна та фіксували отримане значення упору.

Під час комп'ютерного моделювання швидкість потоку прирівнювалась до швидкості руху АНПА, відхилення потоку досягалось за рахунок повороту насадки або колонки на необхідний кут, враховуючи конструктивні особливості застосованого РКП.

Для проведення числового експерименту за допомогою інструментів програми Solid Works було побудовано твердотільні моделі насадки, кронштейна, приводу та гребного гвинта відповідних розмірів. У ході створення проекту в програмному комплексі FlowVision у боксі, що має форму паралелепіпеда, за допомогою фільтра рухомого тіла було вміщено елементи РКП, що відповідають фізичному експерименту. Розставлені граничні умови входу-виходу, стіни. Також задавалися частота обертання рушія, кут і швидкість потоку, що набігає [20].

До об'єкта дослідження належить рушійно-кермовий пристрій АНПА, що функціонує в косому потоці води.

Предметом дослідження є залежність упору рушія від швидкості та кута набігання потоку.

Основний матеріал. Як уже зазначалось раніше, для отримання повної картини про характер відхилення значення упору рушія в косому потоці води доцільне застосування двох методів моделювання з використанням Simulink моделі АНПА та CFD моделювання з використанням 3D-моделей рушійних пристроїв у суцільному потоці.

У цій роботі розглядається АНПА, що має рушій, співвісний осі зв'язаної системи координат, вектор упору якого проходить через центр мас апарата. В основу Simulink моделі закладено рівняння динаміки АНПА та математичні моделі рушійно-кермових пристроїв, розробку яких описано в [21, с. 148–152; 22, с. 58–59].

Дослідження упору гребного гвинта в поворотній насадці в косому потоці води.

Поворот насадки на деякий кут призводить до відхилення потоку, що набігає на гвинт. Внаслідок зміни кута потоку значно змінюються гідродинамічні характеристики РКП. Шляхом математичного моделювання встановлено, що зі збільшенням кута набігання потоку упор рушія зменшується, що призводить до зниження швидкості руху АНПА.

Методом комп'ютерного моделювання визначено залежність упору РКП від кута повороту насадки та швидкості руху АНПА. На рис. 1 представлено фрагмент із серії комп'ютерних

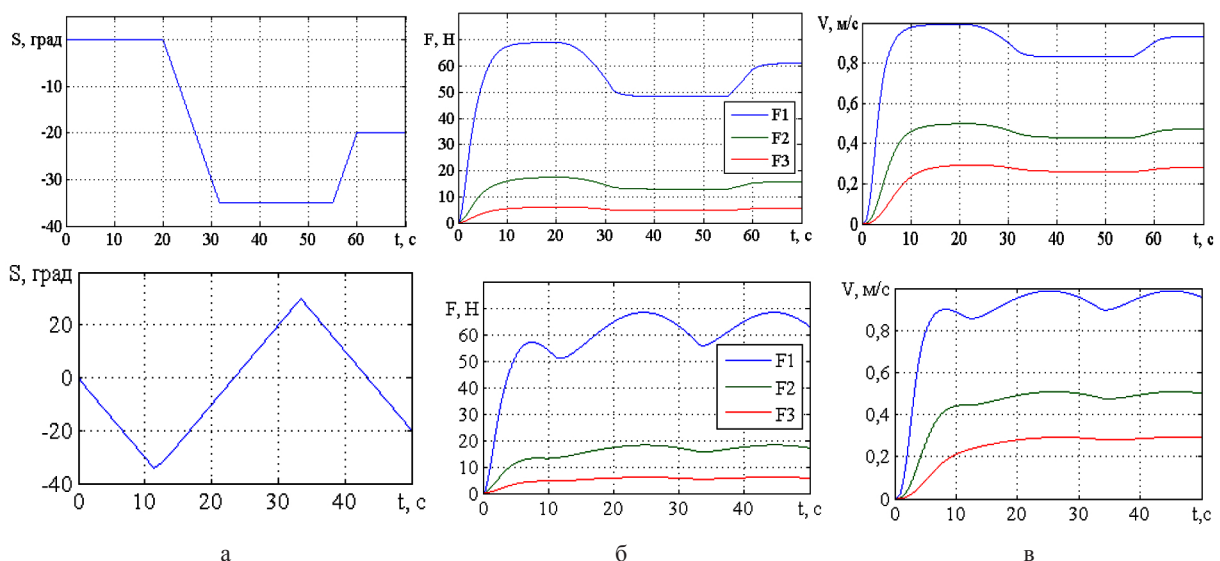


Рис. 1. Дослідження залежності упору за різних режимів руху АНПА: а – кут повороту насадки; б – упор РКП; в – швидкість АНПА

експериментів з визначення залежності упору у разі повороту насадки на кути від 0° до 35° та швидкості $V = 1; 0.5$ та 0.3 м/с.

За аналізом представлених результатів видно, що швидкість потоку у разі повороту насадки також значним чином впливає на відхилення упору РКП: $F(\delta, V)$ – упор РКП, δ – кут потоку, град., V – швидкість потоку, м/с.

$F_1(0,1) = 69,0$ Н; $F_1(35, 1) = 49,0$ Н; відхилення упору становить 28,9%;

$F_2(0,0,5) = 17,4$ Н; $F_2(35, 0,5) = 13,06$ Н; відхилення упору становить 25,15%;

$F_3(0,0,3) = 6,25$ Н; $F_3(35, 0,3) = 4,88$ Н; відхилення упору становить 21,9%.

За результатами моделювання видно, що зі збільшенням кута повороту насадки відбувається зниження упору та загальної тяги рушія. В результаті значно зменшується швидкість руху АНПА. За аналізом представлених результатів можна сказати, що швидкість набігання потоку також значно впливає на значення відхилення упору РКП у разі роботи в косому потоці.

У роботі також отримано залежність упору гребного гвинта в поворотній насадці від обертів гребного гвинта для встановлених кутів набігання потоку, $\delta = 0, 10, 20, 30^\circ$. На рис. 2 представлено результати моделювання з використанням Simulink моделі. Кожна крива на графіку відповідає заданому куту набігання потоку.

Для дослідження описаної залежності проведено CFD моделювання роботи РКП PN160-2 із заданими кутами перекидки насадки [23, с. 19]. Для моделювання використано 3D-модель РКП PN160-2. Поворот насадки здійснюється засобами CAD SolidWorks (рис. 3) [24; 25].

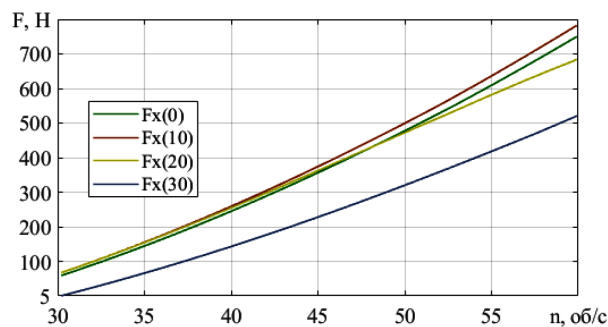


Рис. 2. Залежність упору гребного гвинта в поворотній насадці від частоти обертання гвинта за заданого кута потоку

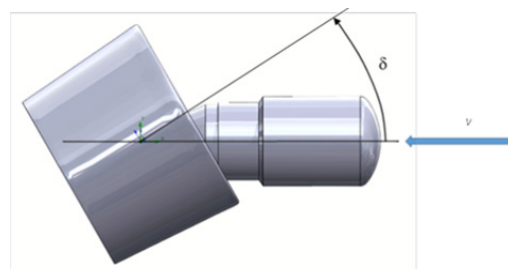


Рис. 3. 3D-модель РКП PN160-2

Далі представлено результат CFD моделювання роботи РКП PN160-2 із заданими кутами перекидки насадки. В таблиці 1 представлено вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку PN160-2 у косому потоці

№ експерим.	v , м/с	δ°	n , об/с
1–4	3,0	0	30–60
5–8	3,0	10	30–60
9–12	3,0	20	30–60
13–16	3,0	30	30–60

На графіках (рис. 4) представлено залежність упору та бічної сили, що виникає в результаті набігання потоку на відхилений профіль насадки від кута перекидки насадки δ° .

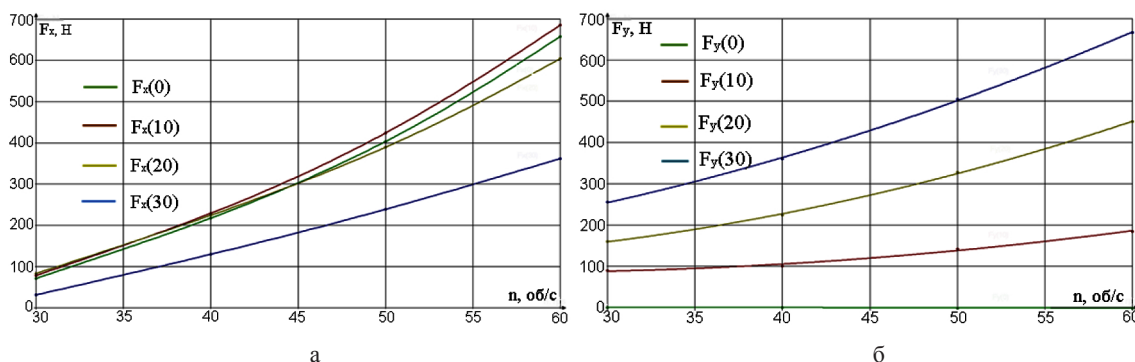


Рис. 4. Залежність: а – упору $F_x(n, \delta^\circ)$; б – бічної сили $F_y(n, \delta^\circ)$

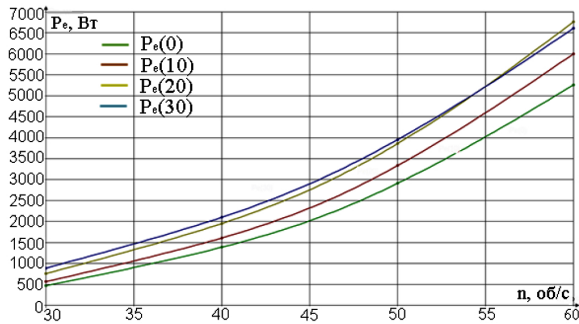


Рис. 5. Залежність потужності, необхідної для обертання ГГ PN160-2

На представлених графіках (рис. 4, 5):

$F_x = T_x + R_x + T_{nx}$ – сумарний упор РКП;

$F_y = T_y + R_y + T_{ny}$ – сумарна бічна сила на РКП;

$P_E = Q_x 2\rho n$ – потужність, необхідна для

обертання гребного гвинта,

де: T_x – упор гребного гвинта; T_y – бічна сила на гребному гвинті; R_x – співвісна сила на комплексі привод-насадка; R_y – бічна сила на комплексі привод-насадка; Q_x – реактивний момент, необхідний для обертання гребного гвинта стосовно вісі Ox ; T_{nx} – упор насадки; T_{ny} – бічна сила на насадці.

Отримані залежності дають можливість виконати аналіз зростання необхідної потужності приводу у разі роботи рушійного пристрою в косому потоці, що є важливим контрольованим параметром для розробки САК. Результати досліджень роботи гребного гвинта у насадці, виконані у пакеті FlowVision за різних кутів натікання потоку, можна використовувати для створення систем автоматичного керування рухом АНПА високої точності.

Дослідження упору поворотної гвинтової колонки в косому потоці. Шляхом математичного моделювання у системі Simulink проведено дослідження упору поворотної

гвинтової колонки (ПГК), що функціонує у косому потоці води. Моделювання проводилось для РКП Model PN160-1. Дослідження проводилось з припущенням, що колонка винесена за корпус апарату і функціонує у ламінарному незбуреному потоці [23, с. 14].

За аналізом результатів моделювання встановлено, що через застосування прямої насадки спостерігається збільшення упору та загальної тяги рушійного пристрою, що своєю чергою призводить до збільшення швидкості руху АНПА. Здебільшого такий вплив вважається позитивним, однак для руху зі стабілізацією швидкості такий вплив необхідно враховувати.

На рис. 6 представлено фрагмент з отриманих результатів моделювання, який відповідає швидкості потоку $V = 1,0$ м/с, при трьох кутах набігання потоку $\delta = 10^\circ, 20^\circ$ і 30° . У цьому випадку кут та швидкість потоку, що набігає, визначались з урахуванням швидкості руху АНПА, та коефіцієнта упору рушійного комплексу, що функціонує у косому потоці.

На графіках представлено кут повороту колонки стосовно потоку та упор ПГК у косому потоці.

Для побудови системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА необхідно визначити залежності між частотою обертання гребного гвинта, упором рушійного пристрою та кутом відхилення потоку. За допомогою математичної моделі динаміки АНПА з поворотною гвинтовою колонкою [22] отримано залежність упору ПГК від обертів гребного гвинта (рис. 7). Кожна крива на графіку відповідає заданому куту набігання потоку, $\delta = 0, 10, 20, 30^\circ$.

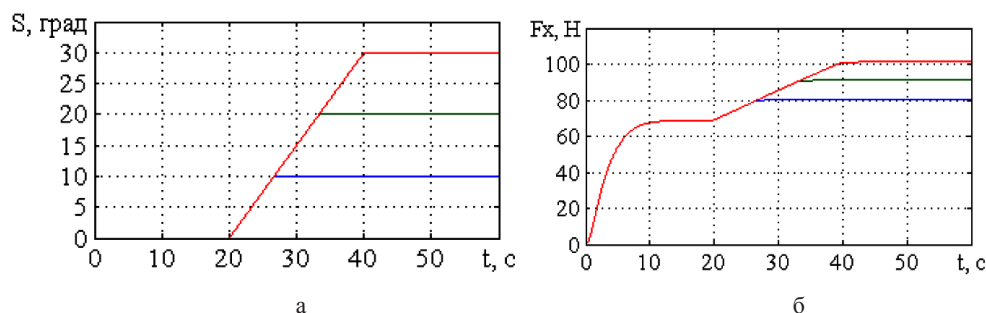


Рис. 6. Дослідження залежності упору ПГК від кута набігання потоку: а – кут набігання потоку на ПГК; б – упор ПГК у косому потоці

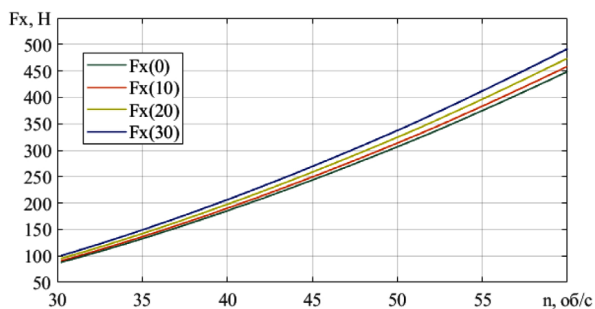


Рис. 7. Залежність упору поворотної гвинтової колонки від обертів гребного гвинта

Для більш детального вивчення залежності упору ПГК від кута та швидкості набігання потоку доцільно застосування CFD моделювання рушія PN160-1 у косому потоці. Для побудови 3D-моделей використані авторські програми генерації насадок (GSN3D) і гребних гвинтів (GSP3D) і CAD Solid Works, а для визначення діючих сил і моментів – модуль Flow Simulation [23].

На рис. 8 представлено 3D-модель гребного гвинта, насадки та приводу PN160-1, побудовану в CAD Solid Works. Далі представлено результат CFD моделювання роботи гвинта в напрямній насадці (PN160-1) у косому потоці. В таблиці 2 представлено вихідні дані для розрахунків, де: v – швидкість потоку, що набігає; δ° – кут між напрямком потоку, що набігає, і віссю Ox (вісь обертання гребного гвинта); n – частота обертання гребного гвинта.

На рис. 9 представлено залежність упору поворотної гвинтової колонки в косому потоці $F_x(n, \delta^\circ)$ та бічної сили $F_y(n, \delta^\circ)$.

Робота ПГК PN160-1 у косому потоці супроводжується виникненням помітних бічних сил, що призводить до зростання упору

рушія, але не призводить до істотної зміни необхідної потужності приводу (рис. 10).

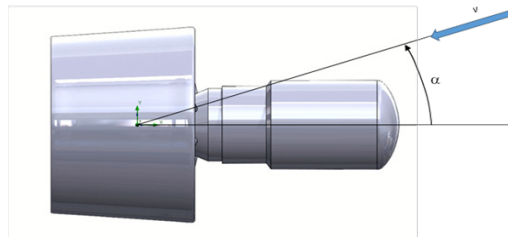


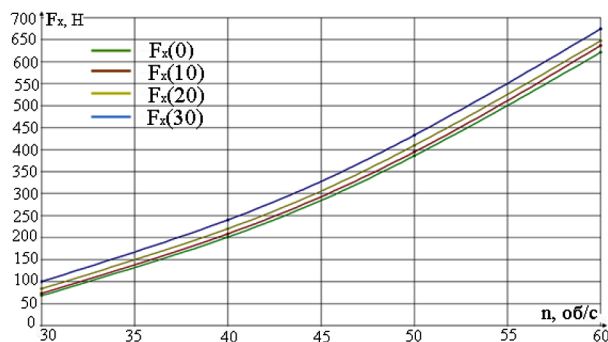
Рис. 8. Побудова 3D-моделі PN160-1

Таблиця 2. Вихідні дані для розрахунку PN160-1 у косому потоці води

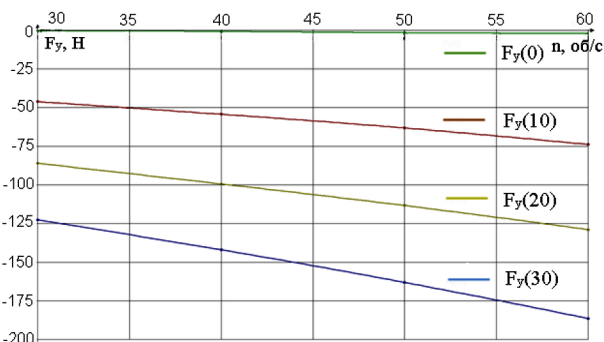
№ експерим.	v , м/с	δ°	n , об/с
1–4	3,0	0	30–60
5–8	3,0	10	30–60
9–12	3,0	20	30–60
13–16	3,0	30	30–60

У результаті проведених досліджень отримано залежності упору гребного гвинта в поворотній насадці та поворотної гвинтової колонки від кута та швидкості потоку води. Для найбільш застосованого типового режиму руху АНПА такого класу проведено детальне дослідження відхилення упору рушія в косому потоці із застосуванням CFD моделі в діапазоні швидкості потоку від 0 до 3 м/с та кутів набігання потоку від 0 до 35°.

Отримані дані утворюють теоретичну основу для створення високоточної системи автоматичного керування з попередженням можливого відхилення та використанням уточненого значення упору, бічної сили і необхідної потужності приводу у разі роботи в косому потоці.



а



б

Рис. 9. Дослідження залежності: а – упору ПГК $F_x(n, \delta^\circ)$; б – бічної сили $F_y(n, \delta^\circ)$ для PN160-1

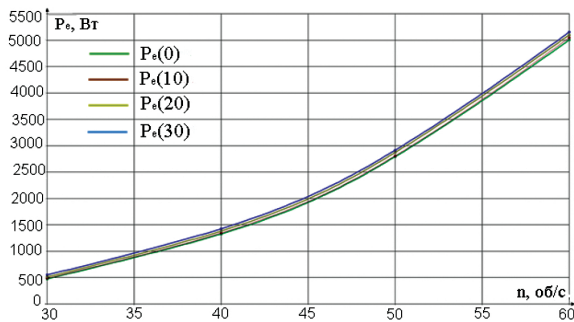


Рис. 10. Залежність необхідної потужності ПГК у косому потоці для PN160-1

Обговорення отриманих результатів.

Використання математичної моделі динаміки об'єкта керування є важливим інструментом, який широко застосовується у проектуванні систем автоматичного керування роботизованими комплексами. Особливо коли виникає потреба у покращенні продуктивності розробленої САК за рахунок глибшого дослідження гідродинаміки та ідентифікації динаміки підводних апаратів [26]. Однак ідентифікація гідродинамічних параметрів є дуже важкою та складною справою [27]. Деякі елементи руху підводних апаратів важко охарактеризувати гідродинамічно [28; 29]. Найбільша проблема, яка виникає у розробці ефективного автоматичного регулятора [30; 31], полягає в тому, що важко визначити значення гідродинамічних параметрів з достатньою точністю. Традиційно гідродинамічні коефіцієнти визначають шляхом буксирування самого апарату або його зменшеної моделі [32; 33], після чого застосовують методи ідентифікації системи.

Запропоновані в роботі методи визначення упору рушійних пристроїв у разі роботи в косому потоці води дають можливість отримати уточнені гідродинамічні параметри РКП та зменшити витрати на натурні випробування, що робить таку роботу важливою з практичної точки зору.

Як відомо, АНПА застосовує різні типи траєкторного руху [34], що мають власні гідродинамічні особливості, які необхідно враховувати у системі керування, тому застосування моделі динаміки АНПА дає можливість виконувати дослідження для різних типів траєкторного руху.

Особливу роль у динаміці руху апарата відіграють засоби керування АНПА, це можуть бути як різноманітні гідродинамічні крила, встановлені на корпусі апарату, так і насадки та рулі у поєднанні з гребним гвинтом. Для покращення якості роботи системи керування важливо мати чітке уявлення про вплив на динаміку апарату з боку елементів керування та зовнішнього збурення. Для проведення такого роду дослідження витрачається багато часу та ресурсів, однак застосування моделей турбулентних потоків рідини дає можливість проводити дослідження шляхом математичного моделювання [23]. За наявності достовірних об'ємних моделей рушійно-кормових пристроїв або корпусу апарату з гідродинамічними крилами [9; 10] можна виконати чисельний розрахунок необхідних параметрів із встановленням умов моделювання.

Отримана в цій роботі вибірка даних дає змогу доповнити систему автоматичного керування швидкістю руху підводного апарата регулятором компенсації упору РКП у разі роботи в косому потоці води. Як уже обговорювалось раніше, упор рушія в косому потоці води змінюється залежно від його конструктивних особливостей. Тому щоб не витрачати час на виправлення похибки керування, значення корегування сигналу керування можна обчислювати засобами інтелектуального керування на базі отриманої вибірки даних. Очевидно, що точність керування в цьому випадку буде залежати від точності отриманих даних, тому на практиці широко застосовується поєднання декількох методів досліджень. Поєднання імітаційного моделювання та числового розрахунку гідродинамічних параметрів з використанням 3D-моделей гребного гвинта в поворотній насадці та поворотної гвинтової колонки дало можливість отримати достовірну вибірку даних, що описує залежність упору рушія від кута та швидкості набігання потоку води. В роботі дослідження проводилось для типових режимів руху АНПА малого класу в діапазоні швидкості від 0 до 3 м/с, та з кутом повороту насадки чи колонки від 0 до 35°. Саме ці режими є робочими для такого класу АНПА, тому отримання уточне-

них гідродинамічних характеристик рушіїв у цьому діапазоні значень мають важливе практичне значення у проектуванні систем керування.

Висновки. Шляхом імітаційного моделювання руху АНПА з рушійно-кермовими пристроями, типів гребний гвинт у поворотній насадці та поворотна гвинтова колонка в косому потоці води, сформовано вибірку даних, що у векторній формі описує залежність упору РКП від двох змінних – швидкості та кута набігання потоку води.

Для уточнення упору рушіїв у встановленому діапазоні кутів та швидкостей у роботі проведено моделювання в програмному комплексі FlowVision. В роботі використано твердотільні 3D-моделі рушіїв Model PN160-1 (поворотна гвинтова колонка) та Model PN160-2 (гребний гвинт у поворотній насадці). Для побудови 3D-моделей використані авторські програми генерації насадок і гребних гвинтів, а для визначення

діючих сил і моментів застосовано модуль Flow Simulation.

У результаті чисельного розрахунку отримано такі параметри, як: співвісна сила упору комплексу гвинт-привод-насадка PN160-1; необхідна потужність, що підводиться до гребного гвинта PN160-1; бічна сила на рушії PN160-1; сумарний упор РКП PN160-2; сумарна бічна сила на РКП PN160-2; потужність, необхідна для обертання гребного гвинта PN160-2. Кожна отримана крива відповідає встановленій швидкості та куту набігання потоку: $v = [1; 2; 3]$ м/с, $\delta = [0; 10; 20; 30]^\circ$.

Сформовану у векторному вигляді вибірку даних було використано для навчання нейронної мережі у складі системи автоматичного керування швидкістю руху АНПА. Запропонований підхід дослідження зручно використовувати для отримання та уточнення нелінійних гідродинамічних параметрів АНПА середнього та малого класів.

Список літератури

- [1] Abdullah Al Noman. (2019) Performance analysis of an unmanned under water vehicle using CFD technique. *AIP Conference Proceedings*. DOI: 10.1063/1.5115886.
- [2] Aras, M.S.M., Zhe, K.L., Aripin, M.K., Chaing, T.P., Shah, H.N.M., Khamis, A. & Rashid, M.Z.A. (2019) Design analysis and modelling of autonomous underwater vehicle (AUV) using CAD. *Indian J. Geo-Marine Sci.*, vol. 48, pp. 1081–1090.
- [3] Bhat, I. Stenius & T. Miao. (2021) “Real-time flight simulation of hydrobatic AUVs over the full 00–3600 envelope”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, No. 4, 1114–1131. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3076178>.
- [4] Zhu, X., Bao-Wei, S., Zhi-xiong, S. and Peng, W. (2012) Hydrodynamic Characteristics Analysis of UUV Parking on the Seabed. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 4.
- [5] Du, X. Wang, H., Hao, C. and Li, X. (2014) Analysis of hydrodynamic characteristics of unmanned underwater vehicle moving close to the sea bottom. *Def. Technol.*, 10/1, pp. 76–81.
- [6] Tang, M. Zhang, Z. and Xing, Y. (2011) Analysis of New Developments and Key Technologies of Autonomous Underwater Vehicle in Marine Survey. *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 10, Part C, pp. 1992–1999.
- [7] Phillips, A., Furlong, M. and Turnock, S.R. (2007) The use of Computational Fluid Dynamics to Determine the Dynamic Stability of an Autonomous Underwater Vehicle.
- [8] Dantas, J.L.D. and De Barros, E.A. (2013) Numerical analysis of control surface effects on AUV manoeuvrability. *Applied Ocean Research*, vol. 42, pp. 168–181.
- [9] Vasudev, K.L. Sharma, R. and Bhattacharyya, S.K. (2014) A multi-objective optimization design framework integrated with CFD for the design of AUVs. *Methods Oceanogr.*
- [10] Esmaeilifar, E. Hassan, M. and Forouzi, B. (2017) Hydrodynamic simulation of an oscillating hydrofoil near free surface in critical unsteady parameter. *Ocean Eng.*, vol. 141, pp. 227–236.
- [11] SOLIDWORKS Flow Simulation. URL: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation>.

- [12] ANSYS. URL: <https://www.ansys.com/>.
- [13] ANSYS Fluid Flow. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids>.
- [14] ANSYS Meshing. URL: <https://simutechgroup.com/why-is-meshing-important-for-fea-fluidsimulations/>.
- [15] Gurynenko, S.O., Bouraou, N.I., Surgok, V.O. (2023) Simulation and analysis of the complex movement of an autonomous unmanned underwater vehicle. *Electronic modelling*, 45(3):81–91. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.45.03.081>.
- [16] Korol, Yu. (2021) Computational Fluid Dynamics Methods for Designing the Propeller-Steering Complex of Submarine. *Modern Environmental Science and Engineering* (ISSN 2333-2581), Volume 7, No. 3, pp. 223–231 DOI: 10.15341/mese(2333-2581)/03.07.2021/005 Academic Star Publishing Company, www.academicstar.us.
- [17] Король, Ю.М. (2019) Методи обчислювальної гідродинаміки у завданнях проектування рушійно-кермового комплексу підводних човнів. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації та ремонту суден, морських технічних засобів та інженерних споруд», Миколаїв.
- [18] Король, Ю.М. (2019). Гідродинамічний аналіз варіантів рушійно-кермового комплексу підводного апарата «Suboff». Матеріали X міжнародної технічної конференції «Інновації у суднобудуванні та океанотехніці». Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв.
- [19] Müller, E. (1981) Results of open water tests with ducted and nonducted propellers with angle of attack from 0 to 360 deg. Polish acad. of sci. hronc. of symposium «Advance in propeller research and design», Gdansk.
- [20] Король, Ю.М. та Бражко, О.С. (2011) Застосування програмного комплексу FlowVision для вирішення завдань роботи гребних гвинтів у косому потоці. *Інновації у суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали II МНТК, Миколаїв : НУК.
- [21] Hrudinina, H.S. (2018) Mathematical modeling of an autonomous uninhabited underwater vehicle dynamics with propeller in the rotary nozzle. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*, 2(10), 144–153. DOI: 10.15589/SMI. <http://smi.nuos.mk.ua/-archive/2018/2/16.pdf>.
- [22] Блінцов, В.С., Грудініна, Г.С., Буруніна, Ж.Ю., та Надточий А.В. (2022) Розробка системи автоматичного керування швидкістю руху автономного ненаселеного підводного апарату. *Журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. Том 33 (72) № 4, 56–65. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/10>.
- [23] Блінцов, В.С., Грудініна Г.С., Король Ю.М., Надточий А.В. (2021) Дослідження роботи рушійно-рульового комплексу підводного апарата в косому потоці води методами математичного моделювання. *Підводна техніка і технологія* : XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю, НУК.
- [24] Король, Ю.М., Дудченко, О.Н. та Корнелюк, О.Н. (2018) Розробка та використання програмного забезпечення для мультипараметричної генерації 3D моделей гребних гвинтів. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали МНТК, Миколаїв : НУК.
- [25] Король, Ю.М. та Бражко, О.С. (2012) Методи обчислювальної гідродинаміки у проблемах проектування телекерованих підводних апаратів. Матеріали МНТК «Інженерні системи 2012». Миколаїв : МНТК.
- [26] Caccia, M. Indiveri, G. and Veruggio, G. (2000) Modeling and identification of open-frame variable configuration unmanned underwater vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25.
- [27] Alessandri, A. Bono, R. Caccia, M. Indiveri, G. and Veruggio, G. (1998). Experiences on the modeling and identification of the heave motion of an open-frame UUV, presented at Oceans Conference Record (IEEE), Nice, Fr.
- [28] Morrison, A.T. and Yoeager, D.R. (1993). Determination of the hydrodynamic parameters of an underwater vehicle during small scale, nonuniform, 1-dimensional translation. Victoria, BC, Canada.

- [29] Gulgun, Talha, Yalçinkaya, İsmail, Erdogan, Mertcan & Stop, Akif. (2021) Investigation of the free vibration characteristic of a propeller planned for use in a thruster in an unmanned underwater vehicle. *European journal of science and technology*. 31(Supp. 1), pp. 870–873. DOI: 10.31590/ejosat.1010720.
- [30] Conte, G., Zanolli, S.M., Scaradozzi, D. and Conti, A. (2004) Evaluation of hydrodynamics parameters of a UUV. A preliminary study, presented at International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, ISCCSP, Hammamet.
- [31] Boehm, J., Berkenpas, E., Henning, B., Rodriguez, M., Shepard, C., & Turchik, A. (2018) Characterization, modeling, and simulation of an ROV thruster using a six degree-of-freedom load cell. Paper presented at the OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston.
- [32] Egeskov, P., Bjerrum, A., Pascoal, A., Silvestre, C., Aage, C. and Smitt, L.W. (1994) Design, construction and hydrodynamic testing of the AUV MARIUS. Cambridge, MA, USA.
- [33] Aage, C. and Smitt, L. Wagner. (1994) Hydrodynamic manoeuvrability data of a flatfish type AUV. Brest, France.
- [34] Блінцов, С.В. (2014) Теоретичні основи автоматичного керування автономними підводними апаратами. Миколаїв : НУК.

© Грудініна Г.С.

Дата надходження статті до редакції: 25.05.2023

Дата затвердження статті до друку: 26.10.2023