

Н. Г. ШЕВЧЕНКО, В. Ю. ІВАЩЕНКО, Є. Ю. РУБЛЕВСЬКИЙ, О. О. ЗАКОРА

ПРОЕКТУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ AXSTREAM®

У роботі використовується програмне забезпечення AxSTREAM® компанії SoftInWay (США) для проектування турбомашин. Національний технічний університет "ХПІ" (м. Харків) отримав право на використання ліцензійного програмного забезпечення та документації торгової марки AxSTREAM® в освітньому процесі. Результати комп'ютерного моделювання та чисельних досліджень отримано у процесі підготовки магістрів за програмою «Галузеве машинобудування». У роботі використовується сучасний підхід до проектування проточних частин гідравлічних машин. Цей підхід заснований на спільному вирішенні прямої та зворотної задач гідродинаміки. Проведено тестування роботи інтерфейсу середовища AxSTREAM® для вирішення задач проектування, розрахунку та оптимізації проточних частин гідравлічних машин. Розглянуто модуль попереднього проектування в система AxSTREAM®. Наведено інформацію про особливості проектування та чисельних досліджень перебігу в'язкої стисливої рідини в проточній частині відцентрового насоса. У роботі отримано проект відцентрового насоса на задані технічні умови. Проведено розрахунки енергетичних параметрів відцентрового насоса. Проведено дослідження впливу обточування робочого колеса на енергетичні характеристики насоса. Виконано розрахунок просторової течії у проточній частині робочого колеса насоса НК 65/35-70. Подано порівняння результатів розрахунків за обома методами з експериментом. Підтверджено доцільність використання напівемпіричних моделей для отримання попередніх наближень щодо оптимізації проточної частини. Проведено огляд сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки.

Ключові слова: відцентровий насос, коефіцієнт корисної дії, натиск, подача, пряме та зворотне завдання, проектування, обчислювальна гідродинаміка, програмне забезпечення AxSTREAM®.

N. SHEVCHENKO, V. IVASHCHENKO, E. RUBLEVSKIY, A. ZAKORA CENTRIFUGAL PUMP DESIGN USING AXSTREAM® SOFTWARE

The work uses AxSTREAM® software and documentation from SoftInWay (USA) for the design of turbomachines. National Technical University "KhPI" (Kharkov) received the right to use licensed software and documentation of the AxSTREAM® trademark in the educational process. The results of computer modeling and numerical studies were obtained in the process of preparing masters under the program "Industrial Mechanical Engineering". The work uses a modern approach to the design of flow parts of hydraulic machines. It is based on the joint solution of direct and inverse problems of hydrodynamics. The operation of the interface of the AxSTREAM® environment was tested to solve the problems of designing, calculating and optimizing the flow parts of hydraulic machines. The preliminary design module in the AxSTREAM® system is considered. The features of designing and numerical simulation of the flow of a viscous incompressible fluid of a centrifugal pump are considered. In the work, a design of a centrifugal pump for the given technical conditions was obtained. The energy parameters of the centrifugal pump have been calculated. A study was made of the influence of impeller turning on the energy characteristics of the pump. The calculation of the spatial flow in the flow part of the impeller of the pump NK 65/35-70 was performed. Comparison of the results of calculations by both methods with experiment is presented. The expediency of using semi-empirical models to obtain preliminary approximations on the optimization of the flow path has been confirmed. A review of modern packages of computational fluid dynamics is carried out.

Keywords: centrifugal pump, efficiency, head, flow, direct and inverse problems, design, computational fluid dynamics, package AxSTREAM®.

Вступ. Актуальним напрямком економічного розвитку країни є впровадження енергозберігаючої політики у всіх галузях народного господарства, введення нових сучасних потужностей і модернізацію існуючих з вирішенням питань екології та ефективності роботи енергетичного обладнання [1]. Одним з перспективних наукових напрямків модернізації технічних об'єктів є чисельне моделювання робочих процесів та технологій. Застосування добре обгрунтованих математичних моделей, поява потужних обчислювальних засобів, розвиток програмного забезпечення, нових інформаційних технологій дає можливість здешевити та скоротити обсяг проектних та експериментальних робіт, прискорити процес впровадження досконалих конструкцій.

Однак, для вирішення сучасних задач по удосконаленню енергетичного обладнання треба мати високопрофесійних фахівців, що володіють сучасними інноваційними технологіями проектування, розробки та наукових досліджень, розуміннями процесів, що відбуваються у технічних об'єктах. Отже, задача використання сучасних методів комп'ютерного

моделювання та чисельних досліджень у навчальному процесі підготовки фахівців за освітніми програмами «Прикладна механіка» та «Галузеве машинобудування», є актуальною.

З метою підвищення якості засвоєння навчального матеріалу здобувачами вищої освіти під час освітнього процесу Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») та компанія SoftInWay Inc. [2, 3] підписали ліцензійну угоду про впровадження у навчальний план освітньої версії системи AxSTREAM® з метою підвищення практичного рівня знань основних принципів проектування енергетичного обладнання та професійної підготовки випускників кафедри гідравлічних машини. Згідно з умовами договору доступ до ліцензованого програмного забезпечення повинен бути обмежений студентами і викладачами НТУ «ХПІ» для некомерційного використання, тобто тільки в освітніх і дослідницьких цілях.

Об'єктом дослідження є гідромеханічні процеси, що відбуваються в відцентрових нагнітачах. Предметом дослідження є закономірності, що

зв'язують гідродинамічні та геометричні параметри із робочими характеристиками відцентрового насоса.

Сучасний підхід до проектування проточних частин гідромашин ґрунтується на спільному вирішенні прямих і зворотних задач теорії робочого процесу. У монографії [4] викладено основні методи дослідження робочого процесу лопатевих гідромашин на основі різних підходів до моделювання технічних об'єктів. Розглянуто питання проектування гідромашин, а також шляхи їх вирішення за допомогою сучасних пакетів прикладних програм. Здійснено аналіз наукових підходів та положень.

Огляд сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки. З розвитком методів математичного моделювання і впровадження в інженерну практику обчислювальних машин з'явилася можливість заміни фізичного експерименту чисельним. Застосування чисельного моделювання надзвичайно розширює можливості аналізу впливу геометричних параметрів на кінематичні та енергетичні характеристики. Чисельний експеримент дозволяє оцінити вплив окремих геометричних параметрів на енергетичні характеристики гідромашини, що дозволило суттєво скоротити термін і вартість досліджень.

У роботах [5, 6] надано огляд програмних продуктів для задач обчислювальної гідродинаміки. Найвідоміші комерційні пакети – Ansys CFX [7, 8] та вільний пакет OpenFOAM [9]. На відміну від дорогих пакетів промислового призначення, ліцензія OpenFOAM є безкоштовною. Програмний пакет OpenFOAM є достатньо відомою та поширеною бібліотекою в академічній спільноті. У роботах [10, 11] надано приклади розрахунків гідродинамічних параметрів у проточних частинах гідравлічних машин за допомогою OpenFOAM.

Інститут проблем машинобудування

ім. А. М. Підгорного є одним з провідних закладів вітчизняних проектувальників гідромашин та дослідників просторової течії рідини в їх проточних частинах. розробив Результати досліджень за допомогою розробленого програмного комплексу моделювання IPMFlow наведено у роботах [12, 13].

Опис середовища AxSTREAM®. Компанія SoftInWay Inc. (США, штат Масахусетс) розробляє продукти для проектування турбо та гідравлічних машин, надає технічні інженерні послуги та використовує розроблені всередині компанії та промислові стандартні CFD та FEA інструменти для того, щоб здійснювати проектувальні завдання на ранньому етапі, щоб максимізувати інженерну продуктивність та збільшити ефективність та надійність обладнання.

Головний продукт AxSTREAM® є інтегрованим рішенням, заснованим на колективному досвіді інженерної команди компанії SoftInWay. Продукт розроблено з метою надання промисловості професійного програмного інструменту для швидкого проектування та оптимізації проточних частин. Платформа програми AxSTREAM®, побудована за принципом блочно-ієрархічного подання процесу проектування. Система AxSTREAM® надає зручний інтерфейс для вирішення задач проектування, розрахунку та оптимізації проточних частин гідромашин.

На рис. 1 надана схема основних модулів. Архітектура програми має можливість розширення шляхом підключення нових завдань. Методи вирішення забезпечують необхідну точність результатів за мінімальних витрат розрахункового часу та ресурсів ЕОМ.

У роботі використані програмні інструменти та документи AxSTREAM® [2].

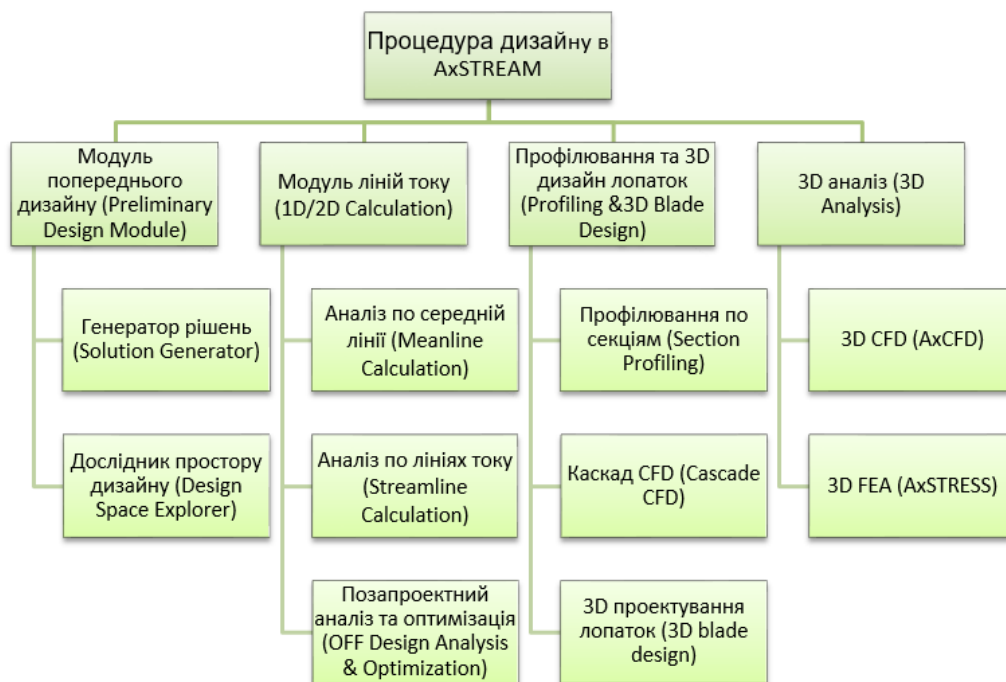


Рис. 1. Схема основних модулів AxSTREAM®

Послідовність проектування в середовищі AxSTREAM®. Процес проектування починається з модуля попереднього дизайну, потім переходить до спрощеного аналізу, далі до профілювання та проектування лопаток, і завершується тривимірним аналізом, згідно [14–17].

Створюємо новий проект в середовищі AxSTREAM®. У діалоговому вікні потрібно обрати тип машини та конфігурацію насоса – рис. 2.

Задаємо основні геометричні та робочі параметри насоса для його подальшого аналізу. У цьому прикладі буде спроектований одноступінчастий відцентровий насос з такими технічними та граничними умовами:

- Тиск на вході – 310 кПа;
- Об'ємна витрата – 65 м³/год;
- Напір – 70 м;
- Частота обертів валу – 2950 об/хв;
- Кількість ступенів – 1;
- Тиск на виході – (1000–1200) кПа;
- Середній діаметр на вході – (100–115) мм;
- Вихідний кут лопатей – (30–60) град.

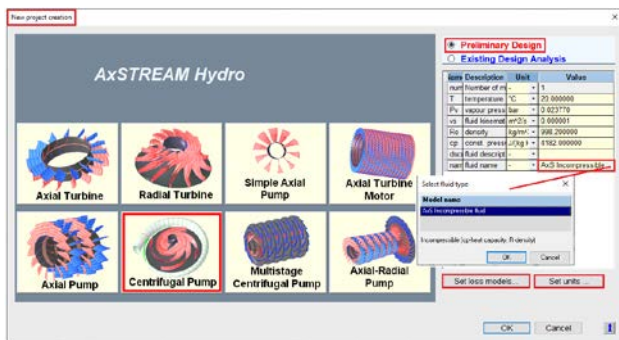


Рис. 2. Вибір типу гідромашини AxSTREAM®

Для обраного типу проточного тракту (рис. 3) обираються моделі втрат, таких як первинні втрати, вторинні втрати, перехідні втрати, розрахунок кута відхилення та інші.

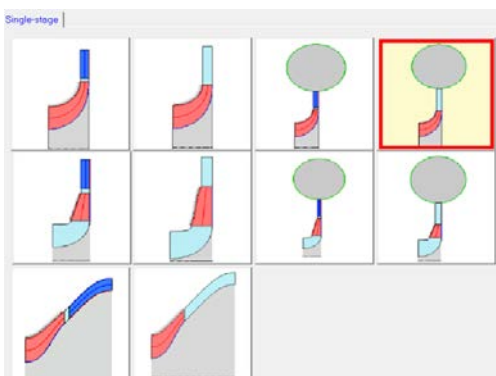


Рис. 3. Вибір конфігурації насоса у середовищі AxSTREAM®

Для обліку профільних втрат у робочому колесі слід вибрати модель втрат «AxS Pump Prof Aungier». Модель втрат «AxS Default» краща для обліку первинних втрат у безлопатковому дифузори та равлику. Для розрахунку кута відхилення слід вибрати модель «AxS RC dev by Wiesner» для робочого колеса

та «фіксований коефіцієнт втрат» для безлопаткового дифузора та равлика.

Модуль попереднього проектування в AxSTREAM® складається з генератора рішень, дослідника простору проектування та PDMar. Це дає користувачеві широкий спектр можливостей для швидкого вибору оптимальних параметрів основного шляху потоку, таких як геометричні розміри та кути і т. д. Процедура попереднього проектування виконує розрахунок зворотного завдання.

Після завершення розрахунків результати представлені в області проектування Design Space, як показано на рис. 4.

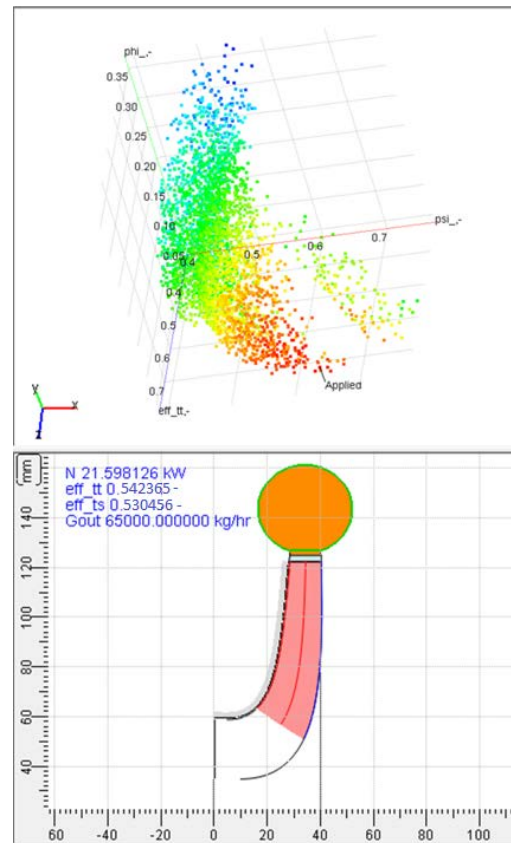


Рис. 4. Область знайдених рішень (Design Space)

В області проектування кожна з точок відповідає конкретній конструкції насоса. Найкраще рішення з області проекта позначено відміткою «Applied». У якості головного критерія обрано коефіцієнт корисної дії – eff_{tt} .

Конструкції насоса матимуть широкий діапазон (від мінімального до максимального) параметрів, таких як діаметри входу/виходу, тангенційна швидкість, відносини діаметрів тощо. Якщо користувачу потрібно фільтрувати проектні рішення, обмежуючи діапазон параметрів на основі особливих вимог, треба використовувати «Design Space Explorer».

Профілювання лопатей робочого колеса (РК).

Профілювання РК відбувається по трьох лініях току лопатей та складається з правильного розподілу кутів β (або θ) та товщини лопатей, згідно [15, 16]. Кути β і θ відповідають за геометрію лопаток та

взаємопов'язані один з одним. Вигляд лопатей РК після згладжування представлено на рис. 5.

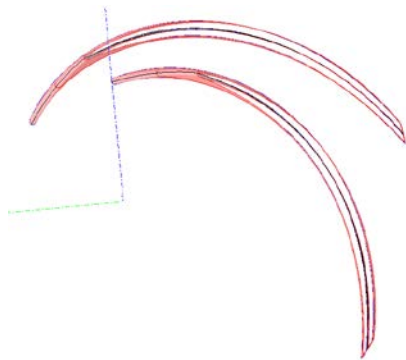


Рис.5. До профілювання лопатей РК

Гідродинамічний розрахунок параметрів насоса. У AxSTREAM® завдання вирішення прямої задачі можна виконувати у двох основних режимах: Meanline mode (аналіз по середній лінії) та Streamline mode (аналіз по лініях току). Meanline mode означає, що вирішувач аналізу бере геометрію каскадів тільки на ділянці середньої лінії. Такий режим вважається найбільш оптимальним та широко використовується в подібних розрахунках, тому даний розрахунок проведений саме у цьому режимі. Модуль виконує вирішення прямої задачі, тому є можливість вибрати постановку завдання: знайти тиск по заданій витраті або знайти витрату по заданому тиску. У даному проекті обрано перший випадок. На рис. 6 надано розподіл тиску на меридіональній проекції проточної частини.

Тривимірне моделювання та гідродинамічний розрахунок насоса. Середовище AxSTREAM® надає можливість формування профілю лопаті та експорту 3D геометрії у зовнішні CFD та FEA – солвери. У рамках дослідницької роботи за робочими креслениками відцентрового насоса НК 65/35-70 були створені тривимірні твердотільні моделі та розрахункова сітка проточної частини. Гідродинамічний розрахунок було виконано за допомогою інструмента AxSTREAM® – AxCFD. На рис. 7 надано результати розподілу тиску у проточній

частини насоса НК 65/35-70.

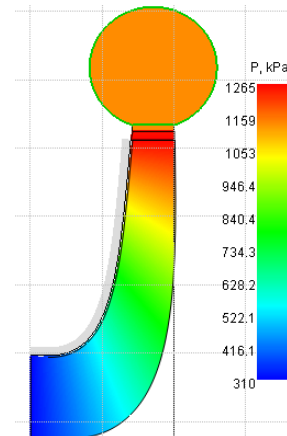


Рис. 6. Розподіл повного тиску у насосі

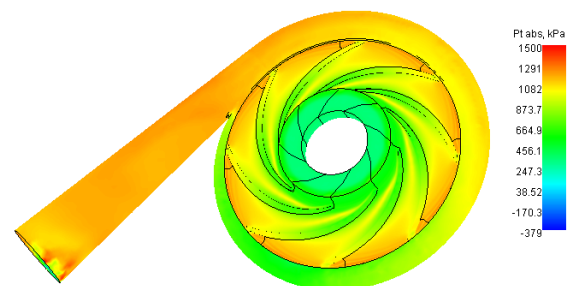


Рис. 7. Розподіл тиску у проточній частині насоса у 3D площині

Побудова енергетичних характеристик.

Чисельні розрахунки по середній лінії току проведено у діапазоні витрати рідини відцентрового насоса $Q = (20-70) \text{ м}^3$ на годину. Чисельні розрахунки тривимірної моделі насоса виконано у робочому діапазоні витрати $Q = (38-70) \text{ м}^3$ на годину.

На рис. 8 надано енергетичні характеристики відцентрового насоса – напору H та коефіцієнта корисної дії (ККД) від витрати рідини Q . Чисельні розрахунки виконано у режимі Meanline mode та AxCFD® середовища AxSTREAM®. Також на рис. 8 надається для порівняння характеристика насоса НК 65-70, що отримана експериментально.

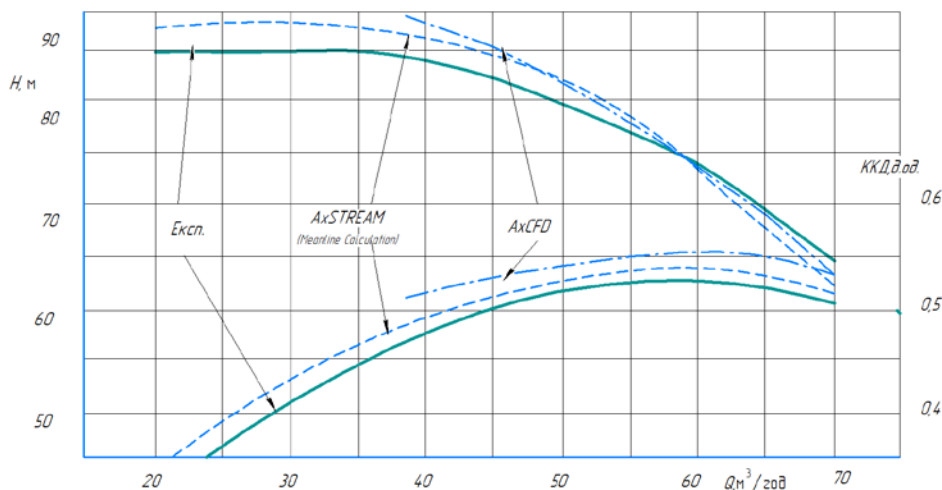


Рис. 8. Залежності напору та ККД від витрати насоса

Дослідження впливу обточки робочого колеса на енергетичні характеристики насоса. У рамках дослідницької роботи розглянуто відцентровий насос НК 65/35-70 у двох модифікаціях. На рис. 9 показано меридіанальні вигляди насосів у двох виконаннях «А» та «В». Вони відрізняються зовнішнім діаметром робочого колеса D_2 та шириною лопатей на виході із колеса. Після розрахунку параметрів насосу в обох виконаннях у номінальному режимі, результати було зведено у табл. 1 для подальшого порівняння та аналізу.

Відцентровий насос у виконанні «А» має значно вищі енергетичні параметри, ніж той же насос у виконанні «В».

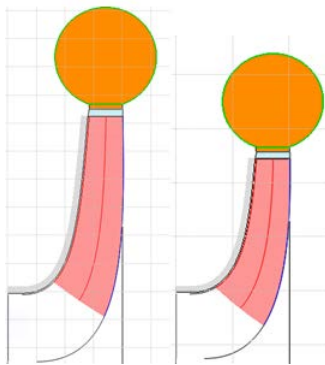


Рис. 9. Меридіанальні вигляди насоса у виконаннях «А» (зліва) та «В» (зправа)

Таблиця 1 – Робота насосу у виконаннях «А» та «В» на номінальному режимі

Параметри	Виконання «А»	Виконання «В»
Q , м ³ /год	65	65
H , м	68	36
N , кВт	22,8	16,2
η	0,54	0,47

Висновки: У середовищі програмного забезпечення AxSTREAM® в рамках дослідницької роботи були виконані чисельні зворотна та пряма задачі. А саме, проектування проточної частини відцентрового насоса та профілювання лопатей на задані умови; обчислення гідродинамічних параметрів спроектованого насоса у режимі Meanline mode та енергетичних характеристик насоса.

За робочими креслениками насоса НК 65/35-70 створено тривимірне моделювання та розрахунок гідродинамічних характеристик потоку в'язкої рідини у середовищі AxSTREAM®.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що модулі проектування відцентрового насоса (зворотна задача) та модулі розв'язання прямої задачі гідродинаміки у режимах Meanline mode та AxCFD середовища AxSTREAM® є достатньо точними. Чисельні моделі надають близькі за значенням результати у порівнянні із паспортними енергетичними характеристиками насоса.

Дані математичні моделі дозволяють надалі проводити чисельні параметричні дослідження та вдосконалення проточної частини відцентрових

насосів. Здатність застосовувати сучасні інформаційні технології при проектуванні та чисельного моделювання робочих процесів надають широку можливість для підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання.

Список літератури

1. *Енергетична стратегія України на період до 2035 року*. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555 (дата звернення: 26.07.2022).
2. AxSTREAM® Software Platform. URL: <https://www.softinway.com/ru/software> (дата звернення: 26.07.2022).
3. *Инженерная компания «Актуальная Механика»*. URL: <http://www.actualmechanics.com/default.asp> (дата звернення: 26.07.2022).
4. Дранковський В. Е., Миронов К. А., Тиньянова І. І., Резва К. С., Крупа Є. С., Кухтенков Ю. М. *Математичне моделювання робочого процесу гідромашин: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 406 с. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/56895/1/Monograph_2022_Drankovskyi_Matematichne_modeliuvannia.pdf (дата звернення: 26.07.2022).
5. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2018, Kharkiv)*. Kharkiv: IEEE, 2018. P. 205–209. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559548
6. Голубев С. О., Лебідь О. Г., Черний Д. І. Засоби комп'ютерного моделювання в галузі обчислювальної гідродинаміки. *Математичне моделювання в економіці*. 2019. № 2. С. 21–39. doi: 10.35350/2409-8876-2019-15-2-21-39
7. ANSYS. URL: <https://www.ansys.com/> (дата звернення: 20.07.2022).
8. Brijkishore, Khare R., Prasad V. Performance Evaluation of Kaplan Turbine with Different Runner Solidity Using CFD. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer, 2020. P. 757–767. doi: 10.1007/978-981-13-8196-6_67
9. OpenFOAM. *Open source CFD. Documentation*. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v2206/doc/index.html> (дата звернення: 26.07.2022).
10. Krupa Y. Calculation of the Spatial Flow in the Francis High-Head Turbine Using the CFD Software Package. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2021. No. 2. P. 87–93. doi: 10.20998/2411-3441.2021.2.13
11. Шевченко Н. Г., Шудрик А. Л., Бондаренко Е. Ю. Исследование течения газожидкостной смеси в проточной части ступени погружного насоса для добычи нефти. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 22 (1244). P. 31–37.
12. Русанов А. В., Гнесін В. І., Хорев О. М., Жандковскі Р., Колодяжна Л. В., Косьянова А. І., Косьянов Д. Ю., Пашенко Н. В., Русанов Р. А., Сухоребрій П. М., Чугай М. О. *Науково-технічні основи моделювання і проектування проточних частин енергетичних турбоустановок*. Харків: Ін-т проблем машинобуд. ім. А. М. Підгорного, 2019. 383 с.
13. Русанов А. В., Хорев О. М., Биков Ю. А., Косьянов Д. Ю. Чисельне моделювання робочого процесу в проточній частині радіально-осьової гідротурбіни PO45. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No. 2. P. 22–29. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.03
14. Говорущенко Ю. Н. *Краткое описание алгоритмов, реализованных в системе AxSTREAM®*. URL: <https://docplayer.com/49669176-Kratkoe-opisanie-algoritmov-realizovannyh-v-sisteme-axstream.html/> (дата звернення: 26.07.2022).
15. AxSTREAM®. *Turbomachinery Design Suite. Tutorial CP1 – Centrifugal Pump Design and Map Generation*. 2018. 50 p. URL: <http://www.actualmechanics.com/default.asp?Page=downloadrus.asp> (дата звернення: 26.07.2022).
16. AxSTREAM®. *Turbomachinery Design Suite. Tutorial CP2 – Centrifugal Pump Analysis Generation*. 2020. 50 p. URL: <http://www.actualmechanics.com/default.asp?Page=downloadrus.asp>

(дата звернення: 26.07.2022).

17. *Centrifugal Pump Design Software – AxSTREAM® Platform Overview*. URL: <https://www.softinway.com/de/machine-type/centrifugal-pump-design/> (дата звернення: 26.07.2022).

References (transliterated)

1. *Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2035 roku* [Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035]. Available at: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555 (accessed 26.07.2022).
2. *AxSTREAM® Software Platform*. Available at: <https://www.softinway.com/ru/software> (accessed 26.07.2022).
3. *Inzhenernaya kompaniya "Aktual'naya Mekhanika"* [Engineering company "Actual Mechanics"]. Available at: <http://www.actualmechanics.com/default.asp> (accessed 26.07.2022).
4. Drankovskyy V. E., Myronov K. A., Tyn'yanova I. I., Ryezva K. S., Krupa Ye. S., Kukhtenkov Yu. M. *Matematychni modelyuvannya robochoho protsesu hidromashyn* [Mathematical modeling of the working process of hydraulic machines]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022. 406 p. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/56895/1/Monograph_2022_Drankovskyy_Matematychni_modelyuvannya.pdf (accessed 26.07.2022).
5. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskyy V., Makarov V. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2018, Kharkiv)*. Kharkiv, IEEE Publ., 2018, pp. 205–209. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559548
6. Holubyev S. O., Lebid' O. H., Chernyy D. I. *Zasoby komp'yuternoho modelyuvannya v haluzi obchyslyval'noyi hidrodinamiki* [Computer modeling tools in the field of computational hydrodynamics]. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*. 2019, no. 2, pp. 21–39. doi: 10.35350/2409-8876-2019-15-2-21-39
7. ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com/> (accessed 20.07.2022).
8. Brijkishore, Khare R., Prasad V. Performance Evaluation of Kaplan Turbine with Different Runner Solidity Using CFD. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore, Springer Publ., 2020, pp. 757–767. doi: 10.1007/978-981-13-8196-6_67
9. *OpenFOAM. Open source CFD. Documentation*. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v2206/doc/index.html> (accessed 26.07.2022).
10. Krupa Y. Calculation of the Spatial Flow in the Francis High-Head Turbine Using the CFD Software Package. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 2, pp. 87–93. doi: 10.20998/2411-3441.2021.2.13
11. Shevchenko N. G., Shudrik A. L., Bondarenko E. Yu. Issledovanie techeniya gazozhidkostnoy smesi v protochnoy chasti stupeni pogruzhnogo nasosa dlya dobychi nefi [Study of the flow of a gas-liquid mixture in the flow path of the impeller of a submersible pump for oil production]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 22 (1244), pp. 31–37.
12. Rusanov A. V., Hnesin V. I., Khoryev O. M., Zhandkovski R., Kolodyazhna L. V., Kos'yanova A. I., Kos'yanov D. Yu., Pashchenko N. V., Rusanov R. A., Sukhorebryy P. M., Chuhay M. O. *Naukovo-tekhichni osnovy modelyuvannya i proektuvannya protochnykh chastyn enerhetychnykh turbostanovok* [Scientific and technical bases of modeling and design of flow parts of power turbines]. Kharkiv, In-t problem mashynobud. im. A. M. Pidhornoho Publ., 2019. 383 p.
13. Rusanov A. V., Khoryev O. M., Bykov Yu. A., Kos'yanov D. Yu. Chysel'ne modelyuvannya robochoho protsesu v protochniy chastyi radial'no-os'ovoyi hidroturbiny RO45 [Numerical modeling of the work process in the flow part of the RO45 radial-axial hydroturbine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 2, pp. 22–29. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.03
14. Govorushchenko Yu. N. *Kratkoe opisanie algoritmov, realizovannykh v sisteme AxSTREAM®* [A brief description of the algorithms implemented in the AxSTREAM® system]. Available at: <https://docplayer.com/49669176-Kratkoe-opisanie-algoritmov-realizovannyh-v-sisteme-axstream.html/> (accessed 26.07.2022).
15. *AxSTREAM®. Turbomachinery Design Suite. Tutorial CP1 – Centrifugal Pump Design and Map Generation*. 2018. 50 p. Available at: <http://www.actualmechanics.com/default.asp?Page=downloadrus.asp> (accessed 26.07.2022).
16. *AxSTREAM®. Turbomachinery Design Suite. Tutorial CP2 – Centrifugal Pump Analysis Generation*. 2020. 50 p. Available at: <http://www.actualmechanics.com/default.asp?Page=downloadrus.asp> (accessed 26.07.2022).
17. *Centrifugal Pump Design Software – AxSTREAM® Platform Overview*. Available at: <https://www.softinway.com/de/machine-type/centrifugal-pump-design/> (accessed 26.07.2022).

Hadziuua (received) 09.08.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна (Shevchenko Nataliya) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-7428>; e-mail: shevng@ukr.net

Іващенко Владислава Юрїївна (Ivashchenko Vladyslava) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-7506>; e-mail: vlada.ivashchenko99@gmail.com

Рублевський Євген Юрїїович (Rublevskiy Evgen) – SoftInWay Inc., керівник групи компресорів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2869-9012>; e-mail: evgen.rublevskiy@outlook.com

Закора Олександр Олександрович (Zakora Oleksandr) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8323>; e-mail: azimuth42.17@ukr.net