

*A. С. РОГОВИЙ, В. Е. ДРАНКОВСЬКИЙ, Д. А. САВЕНКОВ, О. Д. ТИНЬЯНОВ, А. С. АЗАРОВ*

## ОПТИМІЗАЦІЯ СПІРАЛЬНОГО ВІДВОДУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ЗАСОБАМИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто питання проектування та оптимізації спірального відводу відцентрового насоса із застосуванням інтегрованого підходу на основі програмного комплексу ANSYS Vista CPD та тривимірного CFD-моделювання. Показано, що геометрія спірального відводу істотно впливає на гідравлічні втрати, розподіл тиску та загальний коефіцієнт корисної дії гідромашини. Традиційні методи проектування спіральних відводів ґрунтуються на спрощених припущеннях і не враховують складної тривимірної структури течії, що зумовлює необхідність використання чисельних методів. У роботі реалізовано методичку, яка передбачає первинне формування базової геометрії у Vista CPD, генерацію сітки в ANSYS TurboGrid та Mesh, а також розрахунок течії у ANSYS CFX із застосуванням моделей турбулентності SST. Для аналізу взаємодії між робочим колесом і спіральним відводом використано підходи Frozen Rotor та Stage. Показано, що метод Stage забезпечує згладжену картину течії і дозволяє визначити інтегральні характеристики (напір, ККД), тоді як Frozen Rotor є ефективним для виявлення локальних відривів і асиметрії потоку. На основі результатів чисельних досліджень виконано дві модифікації геометрії спірального відводу шляхом варіювання радіусів поперечних перерізів. Це дало змогу зменшити зони відриву біля язика та вирівняти поле швидкостей. Порівняння отриманих результатів показало, що запропоновані модифікації дозволяють підвищити напір із 549 до 592,5 м та збільшити ККД з 0,865 до 0,893. Таким чином, поєднання параметричного проектування у Vista CPD із CFD-оптимізацією у CFX є ефективним підходом для вдосконалення конструкції спіральних відводів відцентрових насосів і забезпечує підвищення їхньої енергоефективності.

**Ключові слова:** відцентровий насос, чисельне моделювання, течія, ефективність, математичне моделювання, спіральний відвід.

*A. ROGOVYI, V. DRANKOVSKIY, D. SAVENKOV, O. TYNIANOV, A. AZAROV*

## OPTIMIZATION OF THE VOLUTE CASING OF A CENTRIFUGAL PUMP USING NUMERICAL MODELING

The paper discusses designing and optimizing a volute for a centrifugal pump using an integrated approach based on the ANSYS Vista CPD software and three-dimensional CFD modeling. It is shown that the geometry of the volute casing significantly affects hydraulic losses, pressure distribution, and the overall efficiency of the hydraulic machine. Traditional methods of designing volutes are based on simplified assumptions and do not consider the complex three-dimensional flow structure, necessitating numerical methods. The paper implements a methodology that involves the initial formation of the basic geometry in Vista CPD, mesh generation in ANSYS TurboGrid and Mesh, and flow calculation in ANSYS CFX using the SST turbulence model. The Frozen Rotor and Stage approaches analyze the interaction between the impeller and the volute casing. It is shown that the Stage method provides a smoothed flow picture and allows for the determination of integral characteristics (head, efficiency). At the same time, the Frozen Rotor is effective for detecting local separations and flow asymmetry. Based on the results of numerical studies, two modifications of the geometry of the volute casing were made by varying the radii of the cross sections. This allowed it to reduce the separation zones near the tongue and equalize the velocity field. A comparison of the results showed that the proposed modifications increase the pressure from 549 to 592.5 m and the efficiency from 0.865 to 0.893. Thus, combining parametric design in Vista CPD with CFD optimization in CFX is a practical approach to improving the design of volute casings for centrifugal pumps and increasing their energy efficiency.

**Keywords:** centrifugal pump, numerical modeling, flow, efficiency, mathematical modeling, volute casing.

**Вступ.** Відцентрові насоси є ключовими елементами сучасних гідроенергетичних та промислових установок [1], оскільки вони забезпечують ефективне перетворення механічної енергії у гідравлічну [2]. Одним з найважливіших конструктивних вузлів таких машин виступає спіральний відвід, призначений для рівномірного збирання та спрямування потоку робочої рідини від робочого колеса до відповідного патрубку [3]. Геометрія спірального відводу визначає розподіл тиску, гідравлічні втрати та, зрештою, енергетичні характеристики насоса. Невдале конструкторське рішення цього елемента може призвести до нерівномірного навантаження на робоче колесо, підвищення вібрацій та зниження коефіцієнта корисної дії [4; 5].

Традиційні підходи до проектування спіральних відводів ґрунтувалися на спрощених аналітичних методиках, які не завжди дозволяють врахувати складну тривимірну структуру течії у внутрішніх каналах машини. Сучасні інженерні практики дедалі частіше спираються на використання засобів комп'ютерного моделювання, що забезпечують більш

гнучке та точне відтворення фізичних процесів. У цьому контексті програмний комплекс ANSYS Vista CPD [6] є одним із найбільш поширених інструментів попереднього проектування відцентрових насосів. Він дозволяє автоматизувати побудову геометрії основних елементів, оптимізувати профіль спірального відводу та інтегрувати отримані результати з подальшими CFD-розрахунками (Computational Fluid Dynamics) [7; 8].

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ККД відцентрових насосів з високим напором шляхом удосконалення проектування спірального відводу, мають як прикладне значення для підвищення надійності та економічності енергетичних систем, так і фундаментальний характер, оскільки пов'язані з поглибленим вивченням складних гідромеханічних процесів у проточних частинах агрегатів.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження, що аналізують вплив геометричних параметрів спіральних відводів відцентрового насоса, однозначно вказують на його істотний внесок у загальні гідравлічні втрати та розподіл тиску в насосі. У роботі [4] показано, що такі параметри, як площа горловини,

форма поперечного перерізу та відстань між лопаткою й язиком спірального відводу суттєво впливають на ККД і криву напору, тому оптимізація відводу є ключовим етапом підвищення ефективності [9].

Подальші чисельні дослідження підтверджують: зміни форми поперечного перерізу спіралі істотно змінюють поле швидкостей та зони рециркуляції біля язика, що прямо корелює із зростанням гідравлічних втрат у частині робочого діапазону. В роботі [10] детально показано залежність робочих характеристик від варіацій перерізу спірального відводу. Це пояснює, чому типова геометрія, за класичними методами та методами САПР, що закладено в Ansys CPD іноді виявляється неефективною для конкретних умов експлуатації.

В роботах [6; 7] продемонстровано синергію методів: попереднє 1D/параметричне проектування у Vista CPD з подальшою тривимірною CFD-оптимізацією дає можливість швидко ітеративно шукати кращі форми спірального відводу. Праці, що використовують Vista CPD як стартову платформу [11; 12], вказують на доцільність такого шляху та проектування проточної частини – від швидкого «завантаження» геометричних параметрів до тонкої налаштувальної оптимізації за допомогою CFD.

Крім прямого проектування насоса та спірального відводу, дослідники застосовують алгоритми оптимізації (включно зі штучним інтелектом і RSM/MOGA) у поєднанні з CFD, щоб знаходити компроміс між напором, ККД та структурними обмеженнями [13; 14]. Це демонструє, що недоліки первісного спірального відводу часто можна мінімізувати алгоритмічною оптимізацією.

Спіральний відвід значною мірою визначає продуктивність насоса, і комбінація ANSYS Vista CPD для попереднього проектування з GPU/CFD-оптимізацією – ефективний шлях для виявлення й виправлення неефективних рішень у проектуванні спіральних відводів [15; 16].

Існує низка програм для проектування спіральних відводів відцентрових насосів, зокрема CFturbo, PumpLinx, NUMECA Fine/Turbo [17]. Вони забезпечують розширені можливості 3D-моделювання та оптимізації, проте потребують значних витрат часу на побудову геометрії та налаштування CFD-аналізу [18; 19]. Перевага ANSYS Vista CPD полягає у швидкому параметричному синтезі геометрії, інтеграції з ANSYS CFX/Fluent і можливості оперативних ітерацій, що скорочує час розробки й підвищує надійність результатів [20].

На цій підставі актуальною задачею є застосування саме інтегрованого підходу для поліпшення спірального відводу й підвищення експлуатаційної ефективності насоса.

**Мета.** Метою роботи є проектування та оптимізація відцентрового насоса за рахунок покращення роботи спірального відводу.

**Результати досліджень.** Методика дослідження складалася з наступних етапів: на першому етапі проектувався відцентровий насос за допомогою програмного забезпечення Ansys Vista CPD з

подальшою генерацією лопатей у Ansys BladeGen, створенням гексагональної сітки у TurboGrid та розрахунком течії у насосі за допомогою Ansys CFX. Спіральний відвід також проектувався за допомогою програми Ansys Vista CPD з подальшим створенням тетрагональної сітки в програмі Ansys Mesh. На другому етапі дослідження після визначення інтегральних показників виконано модифікацію спірального відводу з метою зменшення локальних відривів та зменшення площі прохідного перетину для зменшення кута дифузора. Дослідження виконано чисельним способом із застосуванням програмного забезпечення Ansys CFX.

Математичне моделювання проведено шляхом чисельного вирішення осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса [21], рівняння нерозривності та рівнянь SST-моделі турбулентності [22] для замикання системи. На рис. 1 наведено модель відцентрового насоса зі спіральним відводом, що використано для розрахунку.

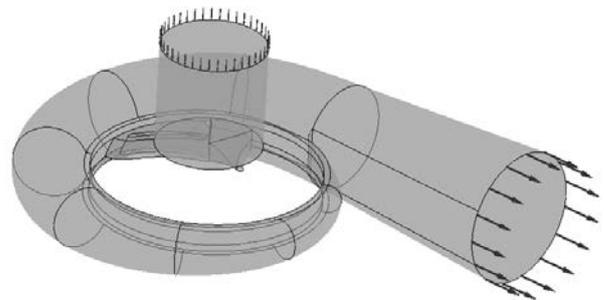


Рис. 1. Розрахункова модель спроектованого відцентрового насоса

Розрахунок здійснено з наступними граничними умовами: на вході задавався повний тиск, що дорівнював атмосферному – 0 Па; на виході задавалася витрата  $39 \text{ м}^3/\text{с}$ . Модель розбита на три частини: вхідна ділянка у всмоктувальному патрубку, робоче колесо та спіральний відвід. Для всмоктувальної ділянки та робочого колеса виконано гексагональну сітку, для спірального відводу – тетрагональну сітку. Під час виконання розрахунку забезпечувався показник  $y^+ < 5$  для всіх сіток. На інтерфейсах між робочим колесом та іншими доменами застосовано умову Frozen Rotor або Stage в залежності від мети конкретного дослідження. За секторного підходу використано сектор з однією лопаттю ( $51,4^\circ$ ). Порівняння інтегральних характеристик виконано після розрахунку з умовою Stage. Спроекований насос відповідає наступним параметрам: частота обертання 500 об/хв; подача  $39 \text{ м}^3/\text{с}$ ; густина рідини  $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; напір 528 м; 7 лопатей.

Розрахунок здійснювався до досягнення двох умов: зменшення нев'язань вирішення рівняння збереження кількості руху до  $10^{-5}$  та забезпечення сталого значення середнього тиску на виході зі спірального відводу протягом 100 ітерацій.

Для забезпечення незалежності результатів

розрахунку від кількості елементів сітки, дослідження виконано для сіткових розбивань наступних розмірів: 0,78 млн. об'ємів; 2,36 млн. об'ємів; 4,23 млн. елементів; 7,85 млн. об'ємів. Тому що різниця за інтегральними показниками (ККД, середній тиск на виході з насоса) не перевищувала 1% починаючи з сіток в 4,23 млн. об'ємів, то така сітка обрана для подальших досліджень.

Для отримання інтегральних характеристик застосовано підхід Stage, але для виявлення зон удосконалення роботи спірального відводу – Frozen Rotor. У режимах розрахунку відцентрових насосів у ANSYS CFX існують два основних підходи для врахування взаємодії між обертовими і нерухомими частинами: Frozen Rotor та Stage [21]. На рис. 2 представлено порівняння результатів розрахунку відцентрового насоса для цих двох підходів.

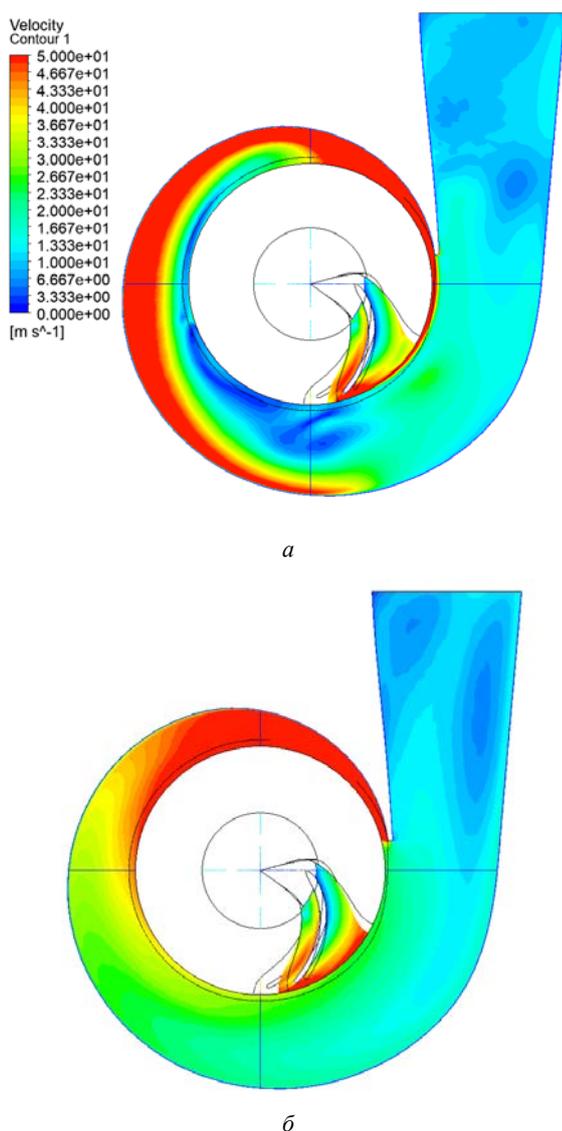


Рис. 2. Поле швидкостей для спроектованого насоса на основі:  
а – Frozen Rotor; б – Stage

Метод Frozen Rotor виконує миттєве «заморожене» поєднання полів швидкостей на межі між обертовим і нерухомих доменами [23]. З рис. 2, а

видно, що зберігається кутова нерівномірність потоку – зони з підвищеним або зниженим тиском, вторинні течії та несиметричні структури. Такий підхід добре відображає локальну взаємодію робочого колеса і спірального відводу, але призводить до «шумної» картини течії, з вираженою несиметрією, а також до занижених прогнозів ККД, оскільки втрати виглядають більшими.

Натомість метод Stage усереднює параметри потоку по колу на границі обертання [24]. Це дає більш згладжену картину течії у спіральному відводі (рис. 2, б): гаситься кутова нерівномірність, зменшується вплив локальних збурень від лопатей. У результаті поля тиску та швидкості у спіральному відводі виглядають більш рівномірними, з менш вираженими зонами рециркуляції. Такий підхід також демонструє вищий розрахунковий ККД, адже усереднення згладжує пікові локальні втрати й формує картину, ближчу до усталеного експериментального середнього режиму [25].

Отже, Stage краще підходить для оцінки інтегральних характеристик (напр., ККД), тоді як Frozen Rotor дає детальнішу, але більш «жорстку» картину взаємодії потоку з лопатями та стінками відводу.

На рис. 2 чітко простежується різниця між підходами Frozen Rotor та Stage у моделюванні течії у спіральному відводі відцентрового насоса. У випадку Frozen Rotor спостерігається виражена кутова нерівномірність розподілу швидкостей: окремі ділянки спірального відводу демонструють різкі градієнти та асиметрію потоку, що зумовлено миттєвою фіксацією взаємного положення лопаток і стінок відводу. Натомість за використання методу Stage швидкісні поля у спіральному відводі виглядають рівномірнішими, а зони локальних рециркуляцій помітно зменшені. Це відповідає більш усталеному режиму роботи насоса. Для підвищення ефективності доцільно оптимізувати геометрію язика, змінити профіль і площу поперечного перерізу спіралі, а також забезпечити плавніше зростання каналу з метою зменшення втрат та вирівнювання поля швидкостей. Для цієї мети виконано модифікацію спірального відводу.

У процесі дослідження було виконано параметричну модифікацію геометрії спірального відводу з метою зниження локальних гідравлічних втрат і вирівнювання розподілу швидкостей. У вихідному варіанті (рис. 2) використано базові радіуси поперечних перерізів, на основі яких розраховано відносні прорости. Для побудови модифікованої геометрії було введено коригувальні коефіцієнти, що дозволило отримати нові значення радіусів відводу (рис. 3).

Додатково було розроблено ще одну варіацію з альтернативними параметрами (рис. 3, в). Вибір напрямів зміни базувався на аналізі картин течії, отриманих у розрахунках за підходом Frozen Rotor, оскільки саме цей метод зберігає куту нерівномірність і локальні відриви, на відміну від згладженого середнього поля Stage.

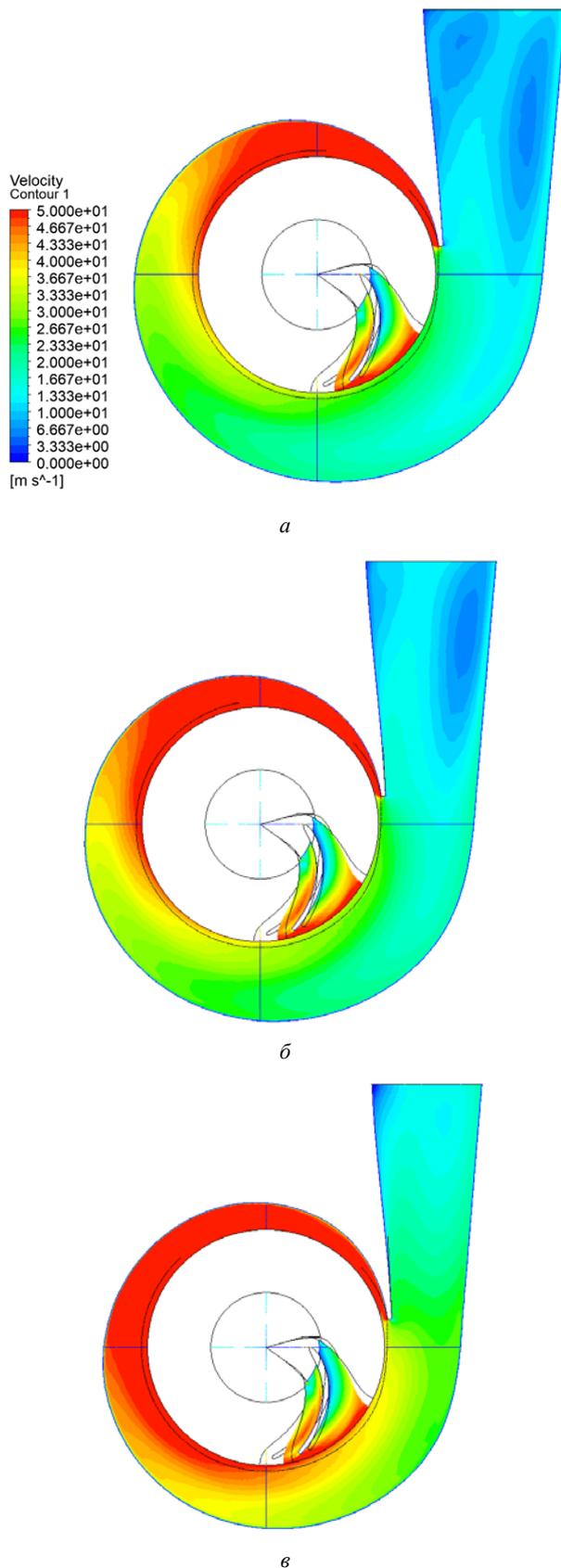


Рис. 3. Поле швидкостей трьох спроектованих спіральних відводів:  
 а – базовий Vista CPD; б – модифікація 1; в – модифікація 2

Таким чином, Frozen Rotor дозволив ідентифікувати проблемні зони в районі язика та

спіралі, що потребували геометричної оптимізації. Подальше порівняння модифікованих варіантів виконувалося із застосуванням підходу Stage.

В табл. 1 наведено інформацію про вплив геометрії спірального відводу на роботу насоса. Порівняно з спіральним відводом та робочим колесом, що запропоновано Vista CPD, оптимізоване колесо і модифікації відводу забезпечили вищий тиск, збільшення напору до 592,5 м та підвищення ККД до 0,893.

Таблиця 1 – Порівняння інтегральних показників роботи трьох відцентрових насосів з різними спіральними відводами в розрахунковій точці  $Q = 39 \text{ м}^3/\text{с}$

Спіральний відвід	Тиск на виході, МПа	Різниця напорів, м	ККД
Vista CPD	5,32	549	0,865
Базовий+оптимізоване робоче колесо	5,63	580	0,879
Модифікація 1	5,63	581	0,883
Модифікація 2	5,69	592,5	0,893

На рис. 3 представлено розподіл швидкостей у спіральному відводі відцентрового насоса для трьох варіантів його геометрії. У базовому варіанті (рис. 3, а) помітна виражена нерівномірність потоку: локальні зони з високими швидкостями поблизу язика та відриви у верхній частині спіралі. Це свідчить про значні гідравлічні втрати та потенційне зниження ККД. У першій модифікації (рис. 3, б) спостерігається вирівнювання розподілу швидкостей, зменшення інтенсивності відривних зон і більш плавний розвиток течії вздовж спіралі, що підтверджує ефективність внесених змін у радіуси поперечних перерізів. Друга модифікація (рис. 3, в) демонструє ще більш рівномірний характер течії та зниження пікових швидкостей у зоні язика, що вказує на подальше зменшення локальних втрат. Таким чином, порівняння трьох варіантів підтверджує, що навіть незначна корекція геометрії спірального відводу може істотно покращити умови обтікання та підвищити енергоефективність насоса.

**Висновки.** В роботі на основі чисельного моделювання течії та CAD-проектування відцентрового насоса проведено оптимізацію ефективності насоса за рахунок покращення роботи спірального відводу.

1. Розроблено методу інтегрованого проектування та оптимізації відцентрового насоса із застосуванням Vista CPD, TurboGrid, Mesh та CFX.

2. Показано, що підхід Frozen Rotor є необхідним для виявлення локальних відривів і несиметрії потоку, тоді як Stage забезпечує визначення інтегральних показників.

3. Внесені модифікації геометрії спірального відводу дозволили усунути відривні течії, знизити гідравлічні втрати та вирівняти розподіл швидкостей у спіралі. Оптимізовані варіанти відводу забезпечили зростання напору майже на 8 % і підвищення ККД до 0,893 у порівнянні з базовою геометрією.

## Список літератури

1. Kondus V., Pavlenko I., Pitel' J., Kulikov O., Rybalchenko V., Ivanov V., Ciszak O. Improvement of the Sewage System for the Nuclear Power Plant WWER-1000 Reactor. *Proc. of the Int. Sci.-Techn. Conf. MANUFACTURING. Vol. 1: Mechanical Engineering: Digitalization, Sustainability and Industry Applications*. Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. P. 279–296.
2. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Polkovnychenko V., Mushtai M. The Influence of the Impeller Inter-blade Channels Roughness on the Energy Parameters of the Submersible Pump. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham : Springer, 2024. P. 253–270. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9\_22
3. Bantelay D. T., Gebresenbet G., Admasu B. T., Gebeyehu S. G. One-dimensional pump geometry prediction modeling for energy loss analysis of pumps working as turbines. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 21. P. 100562. doi: 10.1016/j.ijft.2024.100562
4. Yang S., Kong F., Chen B. Research on pump volute design method using CFD. *International Journal of Rotating Machinery*. 2011. Vol. 2011, issue 1. P. 137860. doi: 10.1155/2011/137860
5. Рєзва К. С., Дранковський В. Е., Шевцов В. М., Оспішева Л. О. Застосування методів математичного моделювання при чисельному дослідженні гідродинамічних характеристик високонапірної оборотної гидромашини. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2020. No. 1. P. 46–52.
6. Alawadhi K., Alzuwayer B., Mohammad T. A., Buhemdi M. H. Design and optimization of a centrifugal pump for slurry transport using the response surface method. *Machines*. 2021. Vol. 9, issue 3. P. 60. doi: 10.3390/machines9030060
7. Nigusse T., Dribssa E. Design and CFD analysis of centrifugal pump. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2015. Vol. 3, issue 3. P. 668–677.
8. Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyi S. Improving the Performance of a Centrifugal Compressor Through Computer-Aided Design and Optimization of Blade Thickness. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham : Springer, 2024. P. 324–333. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9\_28
9. Роговий А. С., Дранковський В. Е., Тиньянов О. Д., Азаров А. С. Проектування оборотної гидромашини засобами Ansys та дослідження течії у насосному режимі. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 2. P. 73–81. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.11
10. Bisht Y. S., Pandey S. D., Shah S. K., Nautiyal A. P., Rawat P., Ghalwan M. ANSYS-CFX are used to design and analyze the internal flow of centrifugal pump impellers. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2771, issue 1. Id. 020036. doi: 10.1063/5.0152285
11. Роговий А. С., Азаров А. С., Демчук Р. М. Удосконалення характеристик робочого колеса високонапірного відцентрового компресора проектуванням за допомогою САПР. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
12. Ellorde K. J. A. T., Ignacio K. J. I. E., Sanchez E. V. A., Sesima A. A. A., Umali R. D., Manuel M. C. E., Tud R. C. Numerical Investigation on the Effects of Varying Centrifugal Impeller Blade Number on Pump Head and Efficiency Using ANSYS 2020 R2. *Proc. of the 2021 IEEE Int. Conf. on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS) (26–26 June 2021, Shah Alam, Malaysia)*. IEEE, 2021. P. 219–224. doi: 10.1109/I2CACIS52118.2021.9495917
13. Wang C. N., Yang F. C., Nguyen V. T. T., Vo N. T. CFD analysis and optimum design for a centrifugal pump using an effectively artificial intelligent algorithm. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, issue 8. P. 1208. doi: 10.3390/mi13081208
14. Zhang J. Mechanical Mode Analysis of Centrifugal Pump Impellers Based on Numerical Simulations. *Advances in Civil Engineering*. 2025. Vol. 2025. A. id 9517169. 12 p. doi: 10.1155/adce/9517169
15. Abuan J., Honra J. Numerical Investigation and Design Optimization of Centrifugal Water Pump with Splitter Blades Using Response Surface Method. *Designs*. 2025. Vol. 9, issue 2. P. 40. doi: 10.3390/designs9020040
16. Bhukya N. K., Sharma G. K., Rai A. K. Blade parameter optimization in Pump As Turbine (PAT). *Proc. of the Int. Conf. on Renewable and Clean Energy*. Singapore : Springer Nature Singapore, 2024. P. 3–12.
17. Moutsios V., Margaris D., Gongolidis M. Investigation of Similarity of Performance of the Equations of State Available in CFTurbo For H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and Air. *International Journal of Chemical Engineering and Materials*. 2024. Vol. 3. P. 132–144. doi: 10.37394/232031.2024.3.11
18. Rusanov A., Khorev O., Agibalov Y., Bykov Y., Korotaiev P. Numerical and experimental research of radial-axial pump-turbine models with splitters in turbine mode. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 188*. Cham : Springer, 2020. P. 427–439. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7\_36
19. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul, 2020. P. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
20. Rogovyi A., Azarov A., Diordiev V., Rohach Y., Avershyn A., Khovanskyi S. High-pressure centrifugal compressor performance enhancement by improving the radial diffuser. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3238, issue 1. P. 020005. doi: 10.1063/5.0249175
21. ANSYS, C. *R24.1 Help manual*. ANSYS Inc. 2024.
22. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine)*. Kharkiv, 2021. P. 681–685.
23. Jin Z., Mao K., Li Z., Li J. A comparison of static and rotordynamic characteristics for three types of impeller front seals in a liquid oxygen turbopump. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2023. Vol. 145, issue 3. P. 031025. doi: 10.1115/1.4055351
24. Dickenson J., Buick J. M., Radulovic J., Bull J. Challenges in CFD Model Validation: A Case Study Approach Using ANSYS CFX and TurboGrid. *Machines*. 2025. Vol. 13, issue 7. P. 593. doi: 10.3390/machines13070593
25. Yan C., Wang B., He X., Zhao F., Zheng X., Vahdati M., Zheng X. Extension and Validation of the Turbomachinery Capabilities of SU2 Open Source Computational Fluid Dynamic Code. *Journal of Turbomachinery*. 2024. Vol. 146, issue 6. P. 061003. doi: 10.1115/1.4064341

## References (transliterated)

1. Kondus V., Pavlenko I., Pitel' J., Kulikov O., Rybalchenko V., Ivanov V., Ciszak O. Improvement of the Sewage System for the Nuclear Power Plant WWER-1000 Reactor. *Proc. of the Int. Sci.-Techn. Conf. MANUFACTURING. Vol. 1: Mechanical Engineering: Digitalization, Sustainability and Industry Applications*. Cham, Springer Nature Switzerland Publ., 2024, pp. 279–296.
2. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Polkovnychenko V., Mushtai M. The Influence of the Impeller Inter-blade Channels Roughness on the Energy Parameters of the Submersible Pump. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham, Springer Publ., 2024, pp. 253–270. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9\_22
3. Bantelay D. T., Gebresenbet G., Admasu B. T., Gebeyehu S. G. One-dimensional pump geometry prediction modeling for energy loss analysis of pumps working as turbines. *International Journal of Thermofluids*. 2024, vol. 21, p. 100562. doi: 10.1016/j.ijft.2024.100562
4. Yang S., Kong F., Chen B. Research on pump volute design method using CFD. *International Journal of Rotating Machinery*. 2011, vol. 2011 (1), issue 1, p. 137860. doi: 10.1155/2011/137860
5. Ryezva K. S., Drankovskyy V. E., Shevtsov V. M., Ospishcheva L. O. Zastosuvannya metodiv matematychnoho modelyuvannya pry chysel'nomu doslidzhenni hidrodynamichnykh kharakterystyk vysokonapirnoyi oborotnoyi hydromashyny [The

- application of methods of mathematical modeling for the numerical research of hydrodynamic characteristics of a high-head reversible hydraulic machine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 1, pp. 46–52.
6. Alawadhi K., Alzuwayer B., Mohammad T. A., Buhemdi M. H. Design and optimization of a centrifugal pump for slurry transport using the response surface method. *Machines*. 2021, vol. 9, issue 3, p. 60. doi: 10.3390/machines9030060
  7. Nigussie T., Dribssa E. Design and CFD analysis of centrifugal pump. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2015, vol. 3, issue 3, pp. 668–677.
  8. Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyi S. Improving the Performance of a Centrifugal Compressor Through Computer-Aided Design and Optimization of Blade Thickness. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham, Springer Publ., 2024, pp. 324–333. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9\_28
  9. Rogovyi A. S., Drankovskiy V. E., Tynianov O. D., Azarov A. S. Proyektuvannya oborotnoyi hidromashyny zasobamy Ansys ta doslidzhennya techiyi u nasosnomu rezhymi [Designing a reversible hydraulic machine with Ansys and studying the flow in the pumping mode]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 2, pp. 73–81. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.11
  10. Bisht Y. S., Pandey S. D., Shah S. K., Nautiyal A. P., Rawat P., Ghalwan M. ANSYS-CFX are used to design and analyze the internal flow of centrifugal pump impellers. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2771, issue 1, id. 020036. doi: 10.1063/5.0152285
  11. Rogovyi A. S., Azarov A. S., Demchuk R. M. Udoslodzhennya kharakterystyk robochoho koleasa vysokonapimoho vidstremovoho kompresora proyektuvannyam za dopomohoyu SAPR [Improving characteristics of the impeller of a high-pressure centrifugal compressor by designing with the help of CAD]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
  12. Ellorde K. J. A. T., Ignacio K. J. I. E., Sanchez E. V. A., Sesima A. A. A., Umali R. D., Manuel M. C. E., Tud R. C. Numerical Investigation on the Effects of Varying Centrifugal Impeller Blade Number on Pump Head and Efficiency Using ANSYS 2020 R2. *Proc. of the 2021 IEEE Int. Conf. on Automatic Control & Intelligent Systems (I2CACIS) (26–26 June 2021, Shah Alam, Malaysia)*. IEEE Publ., 2021, pp. 219–224. doi: 10.1109/I2CACIS52118.2021.9495917
  13. Wang C. N., Yang F. C., Nguyen V. T. T., Vo N. T. CFD analysis and optimum design for a centrifugal pump using an effectively artificial intelligent algorithm. *Micromachines*. 2022, vol. 13, issue 8, p. 1208. doi: 10.3390/mi13081208
  14. Zhang J. Mechanical Mode Analysis of Centrifugal Pump Impellers Based on Numerical Simulations. *Advances in Civil Engineering*. 2025, vol. 2025, a. id 9517169, 12 p. doi: 10.1155/adce/9517169
  15. Abuan J., Honra J. Numerical Investigation and Design Optimization of Centrifugal Water Pump with Splitter Blades Using Response Surface Method. *Designs*. 2025, vol. 9, issue 2, p. 40. doi: 10.3390/designs9020040
  16. Bhukya N. K., Sharma G. K., Rai A. K. Blade parameter optimization in Pump As Turbine (PAT). *Proc. of the Int. Conf. on Renewable and Clean Energy*. Singapore, Springer Nature Singapore Publ., 2024, pp. 3–12.
  17. Moutsios V., Margaris D., Gongolidis M. Investigation of Similarity of Performance of the Equations of State Available in CFTurbo For H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and Air. *International Journal of Chemical Engineering and Materials*. 2024, vol. 3, pp. 132–144. doi: 10.37394/232031.2024.3.11
  18. Rusanov A., Khorev O., Agibalov Y., Bykov Y., Korotaiev P. Numerical and experimental research of radial-axial pump-turbine models with splitters in turbine mode. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. ICTM 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 188*. Cham, Springer Publ., 2020, pp. 427–439. doi: 10.1007/978-3-030-66717-7\_36
  19. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination of the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul, 2020, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
  20. Rogovyi A., Azarov A., Diordiev V., Rohach Y., Avershyn A., Khovanskyi S. High-pressure centrifugal compressor performance enhancement by improving the radial diffuser. *AIP Conference Proceedings*. 2025, vol. 3238, issue 1, p. 020005. doi: 10.1063/5.0249175
  21. ANSYS, C. R24.1 Help manual. ANSYS Inc. 2024.
  22. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine)*. Kharkiv, 2021, pp. 681–685.
  23. Jin Z., Mao K., Li Z., Li J. A comparison of static and rotordynamic characteristics for three types of impeller front seals in a liquid oxygen turbopump. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2023, vol. 145, issue 3, p. 031025. doi: 10.1115/1.4055351
  24. Dickenson J., Buick J. M., Radulovic J., Bull J. Challenges in CFD Model Validation: A Case Study Approach Using ANSYS CFX and TurboGrid. *Machines*. 2025, vol. 13, issue 7, p. 593. doi: 10.3390/machines13070593
  25. Yan C., Wang B., He X., Zhao F., Zheng X., Vahdati M., Zheng X. Extension and Validation of the Turbomachinery Capabilities of SU2 Open Source Computational Fluid Dynamic Code. *Journal of Turbomachinery*. 2024, vol. 146, issue 6, p. 061003. doi: 10.1115/1.4064341

Надійшла (received) 08.12.2025

## Відомості про авторів / About the Authors

**Роговий Андрій Сергійович (Rogovyi Andrii)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-4845>; e-mail: [asrogovoy@ukr.net](mailto:asrogovoy@ukr.net)

**Дранковський Віктор Едуардович (Drankovskiy Viktor)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-2094>; e-mail: [drankovskiy50@ukr.net](mailto:drankovskiy50@ukr.net)

**Савенков Дмитро Анатолійович (Savenkov Dmytro)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8654-627X>; e-mail: [dmytro.savenkov@gmail.com](mailto:dmytro.savenkov@gmail.com)

**Тиньянов Олександр Дмитрович (Tynianov Oleksandr)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7224-7152>; e-mail: [oleksandr.tynianov@mit.khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.tynianov@mit.khpi.edu.ua)

**Азаров Андрій Сергійович (Azarov Andrii)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-715X>; e-mail: [andrii.azarov@mit.khpi.edu.ua](mailto:andrii.azarov@mit.khpi.edu.ua)