

Є. С. КРУПА, Р. М. ДЕМЧУК

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ В ПІДВІДНІЙ ЧАСТИНІ РАДІАЛЬНО-ДІАГОНАЛЬНОЇ ГІДРОТУРБИНИ

Представлено результати чисельного дослідження гідродинамічних характеристик підвідної частини нової конструкції високонапірної радіально-діагональної гідротурбіни. Здійснено аналіз ключових вимог до проточної частини гідроагрегатів, призначених для роботи в широкому діапазоні високих напорів, де традиційні радіально-осьові турбіни мають суттєві експлуатаційні обмеження, зокрема вузький робочий діапазон та схильність до кавітаційних явищ. Основна увага приділена перевірці гідродинамічної досконалості підвідних елементів інноваційної турбіни, конструкція якої включає дворядну лопатеву систему робочого колеса та проміжний направляючий апарат для підвищення ефективності та гнучкості регулювання. Для проведення дослідження було створено деталізовану тривимірну геометричну модель підвідної частини, що складається зі спіральної камери, статора та направляючого апарата, у середовищі CAD-програми SolidWorks. На основі створеної моделі виконано чисельний аналіз просторового потоку методами обчислювальної гідродинаміки у програмному комплексі Ansys CFX. Для замикання системи рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом, було використано модель турбулентності $k-\varepsilon$. Проаналізовано отримані поля розподілу швидкостей та тисків, а також візуалізовано лінії току для оцінки структури потоку. Результати моделювання продемонстрували, що конструкція забезпечує формування стабільного та рівномірного потоку на вході до робочого колеса, що є критично важливим для уникнення нерівномірного навантаження на лопаті. Сумарні гідравлічні втрати в підвідній частині становлять 4,7 %. Отримані дані підтверджують високу якість проєктування підвідних елементів та є необхідною основою для подальшого комплексного аналізу всієї проточної частини, що дозволить отримати повну енергетичну характеристику та оцінити її кавітаційні показники. Це дослідження є важливим етапом у валідації нової конструкції, що сприятиме розробці більш надійних та адаптивних гідроенергетичних систем.

Ключові слова: радіально-діагональна гідротурбіна, робоче колесо, направляючий апарат, комбінаторна залежність, коефіцієнт корисної дії, чисельне моделювання.

E. KRUPA, R. DEMCHUK

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW IN THE INLET PASSAGE OF A RADIAL-DIAGONAL HYDROTURBINE

This paper presents the results of a numerical investigation into the hydrodynamic characteristics of the inlet passage of a novel high-head radial-diagonal hydroturbine design. A comprehensive analysis of the primary challenges associated with the flow paths of hydraulic units designed for high-head applications is conducted. It is established that conventional Francis turbines exhibit significant operational limitations in this range, including a narrow efficiency band and a high susceptibility to cavitation phenomena when operating off-design. The primary focus of this research is to verify the hydrodynamic performance of the inlet components of the innovative turbine, whose design incorporates a double-row runner blade system and an intermediate guide vane apparatus. This configuration is intended to enhance overall energy efficiency and provide greater operational flexibility. To facilitate this study, a detailed three-dimensional geometric model of the inlet passage was developed within the SolidWorks CAD environment. Based on this geometric model, a numerical analysis of the three-dimensional fluid flow was performed using computational fluid dynamics methods within the Ansys CFX software suite. The Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations were employed, with the $k-\varepsilon$ turbulence model utilized to ensure closure and accurately simulate turbulent flow behavior. The resulting velocity and pressure distribution fields were thoroughly analyzed, and streamlines were visualized to provide a qualitative assessment of the flow structure. The simulation results demonstrate that the proposed design ensures the formation of a highly stable and uniform flow field at the runner inlet, which is a critical precondition for preventing uneven blade loading and achieving optimal performance. The total calculated hydraulic losses within the inlet passage were found to be 4.7 %. These findings confirm the high quality of the inlet components' design and provide an essential foundation for a subsequent comprehensive analysis of the entire flow path. Future work will aim to determine the complete energy characteristics and evaluate the cavitation performance of the turbine. This research represents a crucial step in the validation of the new design, contributing to the development of more reliable and adaptive hydropower systems.

Keywords: radial-diagonal hydroturbine, runner, wicket gate, gate-blade relationship, efficiency, numerical modelling.

Вступ. Розвиток гідроенергетики, як одного з ключових джерел відновлюваної енергії, нерозривно пов'язаний із вдосконаленням конструкцій гідравлічних турбін. Особливої актуальності набуває розробка нових високоефективних гідроагрегатів, призначених для роботи у високонапірному діапазоні (200–600 м), де традиційні радіально-осьові та поворотно-лопатеві турбіни демонструють значні технічні обмеження. Вузький діапазон експлуатації та схильність до кавітаційних явищ за неоптимальних режимів роботи знижують їхню продуктивність і надійність [1–4].

У попередніх роботах [5–7] авторами було запропоновано конструкцію радіально-діагональної гідротурбіни (РОД), яка покликана усунути зазначені недоліки. Завдяки дворядній лопатевій системі робочого колеса та проміжному направляючому

апарату, конструкція РОД має потенціал для роботи в ширшому діапазоні напорів та витрат, забезпечуючи підвищену стійкість до кавітації та вищий ККД. У згаданій статті [6] було описано конструктивні особливості та теоретичні переваги турбіни, а також створено її попередню тривимірну модель у середовищі SolidWorks.

Однак для практичного підтвердження заявлених переваг необхідний детальний аналіз гідродинамічних процесів у проточній частині. Важливу роль у формуванні потоку відіграє підвідна частина турбіни, що складається зі спіральної камери, статорних колон та направляючого апарата. Саме від її здатності забезпечити рівномірне та безвихрове підведення води до робочого колеса значною мірою залежить загальна ефективність гідроагрегата [2; 5].

Таким чином, метою даної роботи є перевірка

гідродинамічної досконалості спроектованої підвідної частини радіально-діагональної гідротурбіни шляхом створення її уточненої 3D-моделі та проведення чисельного (CFD) аналізу просторового потоку.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

1. Створити деталізовану твердотільну 3D-модель підвідної частини гідротурбіни (спіральна камера, статор, направляючий апарат) у CAD-програмі SolidWorks.

2. Виконати чисельне моделювання стаціонарного турбулентного потоку в підвідній частині за допомогою програмного комплексу Ansys CFX.

3. Проаналізувати отримані результати: візуалізувати поля швидкостей і тисків, дослідити структуру потоку за допомогою ліній току.

4. Провести кількісну оцінку гідравлічних втрат енергії в досліджуваних елементах та дати оцінку ефективності конструкції підводу.

Методика дослідження. Геометрична модель для чисельного аналізу. Основою для даного дослідження слугує детальна тривимірна модель радіально-діагональної гідротурбіни (РОД), процес розробки якої в середовищі CAD SolidWorks був детально представлений у попередній публікації авторів [6]. У даній роботі було описано ключові інженерні виклики та їх вирішення при створенні складної геометрії всієї проточної частини, включаючи дворядне робоче колесо та проміжний направляючий апарат.

Для вирішення поточних завдань даного дослідження, а саме аналізу гідродинамічних характеристик підвідних елементів, із загальної 3D-моделі було виділено окрему розрахункову область.

Ця область (рис. 1) є моделлю підвідної частини гідротурбіни і включає в себе три ключові компоненти:

- Спіральну камеру (СК);
- Статорні колони (статор);
- Основний направляючий апарат (НА).

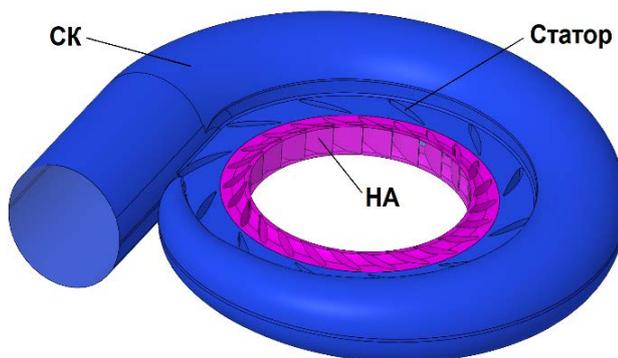


Рис. 1. Тривимірна модель підвідної частини РОД

Саме ця геометрична модель підвідної частини була експортована для подальшої побудови обчислювальної сітки та проведення CFD-аналізу. Такий підхід дозволяє сфокусовано дослідити якість

формування потоку перед його надходженням до робочого колеса, що є першочерговим завданням для забезпечення високої ефективності турбіни.

Чисельне моделювання потоку та математична модель. Для оцінки гідродинамічних характеристик підвідної частини РОД було проведено комплексний чисельний аналіз методом обчислювальної гідродинаміки у програмному комплексі Ansys CFX [8–11].

Моделювання потоку рідини (води) базувалося на розв'язанні системи рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом (RANS). Для замикання системи рівнянь була використана двопараметрична модель турбулентності $k-\epsilon$, яка є промисловим стандартом для розрахунку внутрішніх течій у турбомашині і забезпечує оптимальний баланс між точністю результатів та обчислювальними затратами [12–14].

Налаштування розрахункової моделі включало наступні етапи:

Побудова розрахункової сітки. Була створена гібридна сітка, що складається з 1,5 мільйона елементів. Для забезпечення високої точності розрахунку в зонах зі значними градієнтами потоку, зокрема поблизу поверхонь лопаток направляючого апарата, сітку було локально згущено (рис. 2).

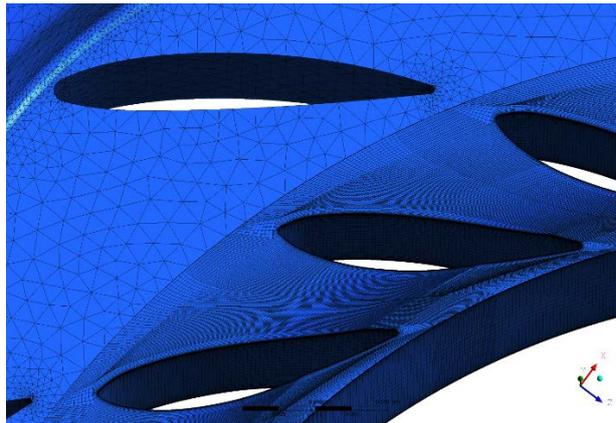


Рис. 2. Розрахункова сітка підводу

Задання граничних умов. На межах розрахункової області були визначені наступні параметри:

- на вході (вхідний переріз спіральної камери): задавалася об'ємна витрата, що відповідає номінальному режиму, $Q = 405$ л/с;
- на виході (вихідний переріз з направляючого апарата): задавався статичний тиск $P = 101325$ Па;
- на стінках: для всіх твердих поверхонь (стілки камери, поверхні лопаток) була встановлена умова "прилипания" (no-slip wall), за якою швидкість рідини на стінці дорівнює нулю.

Параметри розв'язку. Розрахунок проводився для стаціонарного режиму течії. Ітераційний процес продовжувався до досягнення збіжності розв'язку, коли середньоквадратичне значення нев'язок за всіма рівняннями не перевищувало 10^{-4} .

Такий підхід дозволив отримати детальну картину течії в підвідній частині турбіни, визначити

розподіл швидкостей і тисків та кількісно оцінити гідравлічні втрати.

Результати чисельного моделювання. За результатами CFD-моделювання в програмному комплексі Ansys CFX було отримано деталізовані дані про гідродинамічні процеси в підвідній частині радіально-діагональної гідротурбіни. Аналіз цих даних дозволяє оцінити якість формування потоку перед його надходженням до робочого колеса.

Розподіл абсолютної швидкості. На рис. 3 представлено поле розподілу абсолютної швидкості потоку в середньому по направляючому апарату перерізі підвідної частини. Як видно з візуалізації, швидкість потоку плавно зростає у напрямку від зовнішньої периферії спіральної камери до входу в направляючий апарат. Це свідчить про коректне проектування спіральної камери, яка забезпечує поступове прискорення потоку води.

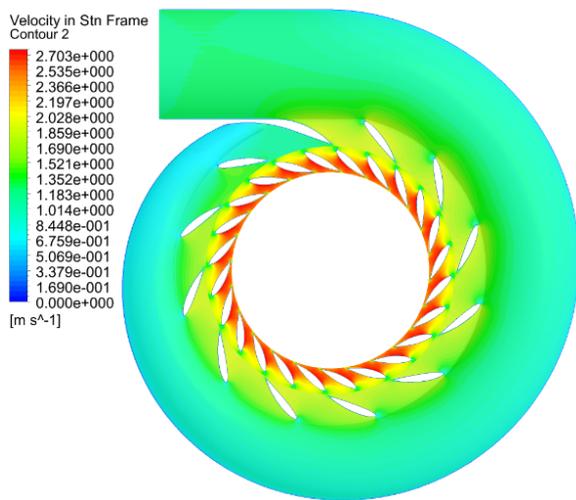


Рис. 3. Поле розподілу абсолютної швидкості в підвідній частині гідротурбіни, м/с

Максимальних значень швидкість досягає в міжлопаткових каналах направляючого апарата, де відбувається фінальне формування потоку та його закрутка перед робочим колесом. Розподіл швидкості є симетричним та рівномірним, що вказує на відсутність значних локальних зон відриву чи гальмування потоку.

Розподіл статичного тиску. Розподіл статичного тиску (рис. 4) корелює з полем швидкостей. Спостерігається поступове зниження тиску вздовж спіральної камери, що є наслідком перетворення енергії тиску в кінетичну енергію потоку. Найбільш інтенсивне падіння тиску відбувається в каналах направляючого апарата, що відповідає зоні максимального прискорення потоку. Плавний градієнт тиску без різких локальних мінімумів свідчить про низьку ймовірність виникнення кавітаційних явищ у підвідних елементах на розрахунковому режимі.

Аналіз структури потоку. Для візуалізації траєкторії руху частинок рідини були побудовані лінії току (рис. 5, 6). Аналіз показує, що потік у спіральній камері має плавну, рівномірну структуру (рис. 5). На

вході до направляючого апарата лінії току впорядковуються і рухаються спрямовано вздовж профілів лопаток (рис. 6). Важливо відзначити, що в розрахунковій області відсутні значні вихрові зони або області рециркуляції, що підтверджує високу гідродинамічну якість спроектованої підвідної частини та її здатність формувати стабільний потік.

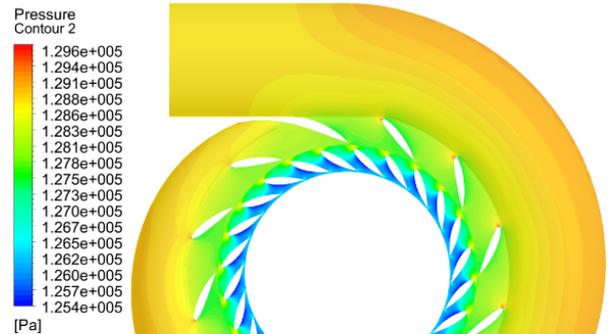


Рис. 4. Поле розподілу статичного тиску в підвідній частині гідротурбіни, Па

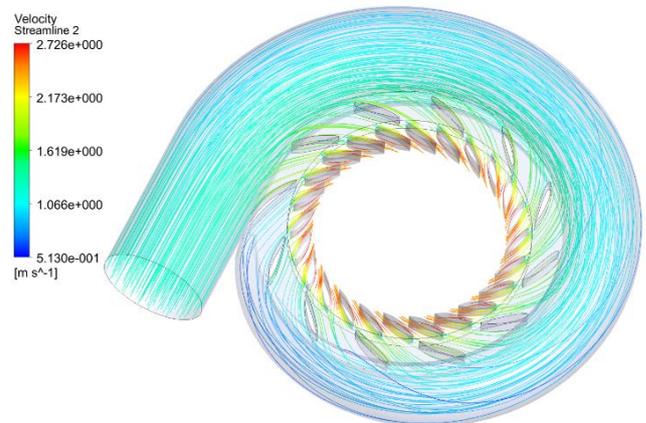


Рис. 5. Лінії току, що ілюструють структуру потоку в спіральній камері та направляючому апараті

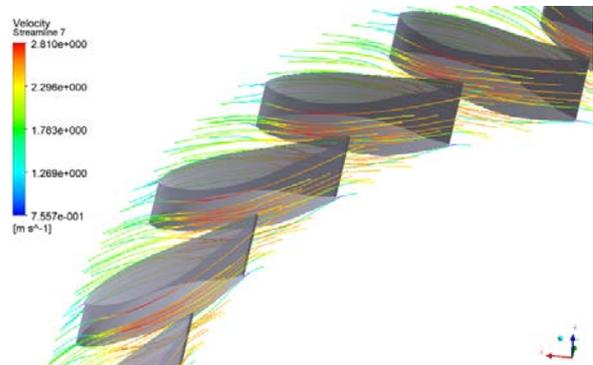


Рис. 6. Лінії току потоку в міжлопаткових каналах направляючого апарата

Кількісна оцінка гідравлічних втрат. Ключовим показником ефективності підвідної

частини є рівень гідравлічних втрат. За результатами розрахунку було визначено втрати повного тиску в окремих елементах та сумарно в усій підвідній частині. Методика розрахунку втрат приведена у публікаціях [8; 12].

Дані наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, сумарні гідравлічні втрати в підвідній частині становлять 4,7 %. З них 3,2 % припадає на спіральну камеру зі статором, і 1,5 % – на направляючий апарат.

Таблиця 1 – Втрати повного тиску в підвідній частині

Елемент	Вхідний повний тиск P_1 , Па	Вихідний повний тиск P_2 , Па	Втрати, %
СК + Статор	129548	129232	3,2
Направляючий апарат (НА)	129232	129084	1,5
Всього (СК + Статор + НА)	129548	129084	4,7

Обговорення результатів. Отримані в ході чисельного моделювання результати дозволяють дати попередню оцінку гідродинамічної ефективності розробленої підвідної частини нової радіально-діагональної гідротурбіни.

Аналіз полів швидкостей, тиску та ліній току (рис. 3–6) свідчить про те, що конструкція спіральної камери, статора та направляючого апарата успішно виконує своє головне завдання – формування стабільного, рівномірного та безвихрового потоку перед входом на робоче колесо.

Плавний характер ліній току та відсутність зон рециркуляції є якісним підтвердженням правильності обраних геометричних параметрів. Рівномірний розподіл швидкості по всьому периметру направляючого апарата є ключовою передумовою для досягнення високого коефіцієнта корисної дії турбіни, оскільки він забезпечує оптимальні умови обтікання лопатей робочого колеса.

Кількісна оцінка показала, що сумарні гідравлічні втрати в підвідній частині становлять 4,7 % (табл. 1). Це значення є цілком прийнятним для високонапірних гідротурбін і свідчить про високу гідродинамічну якість спроектованих елементів. Зменшення гідравлічних втрат на цьому етапі є важливим кроком до підвищення загальної енергетичної ефективності всього гідроагрегата.

Порівнюючи з традиційними радіально-осьовими турбінами, розроблена конструкція РОД має потенціал для кращої адаптивності до змінних режимів роботи. Частково це підтверджується даним аналізом: стабільність потоку, досягнута в підвідній частині, закладає надійну основу для ефективної роботи нового дворядного робочого колеса. Таким чином, результати чисельного аналізу підводо частково підтверджують теоретичні переваги конструкції, заявлені у попередній роботі [6].

Водночас необхідно відзначити обмеження даного дослідження. Аналіз було проведено лише для

підвідної частини та для одного, номінального, режиму експлуатації. Для повної оцінки ефективності та характеристик нової гідротурбіни цього недостатньо. Зокрема, не були досліджені процеси в робочому колесі, проміжному направляючому апараті та відсмоктуючій трубі, а також не проводився аналіз кавітаційних характеристик, що є важливим для високонапірних турбін.

Тому наступним етапом дослідження стане проведення повного чисельного аналізу всієї проточної частини РОД – від входу в спіральну камеру до виходу з відсмоктуючої труби. Це дозволить:

- оцінити розподіл швидкості, тиску та турбулентності в усіх вузлах РОД турбіни;
- перевірити ефективність роботи дворядної лопатевої системи;
- побудувати повну енергетичну характеристику турбіни та визначити її ККД на різних режимах експлуатації;
- розробити рекомендації щодо оптимізації конструкції, зокрема уточнити комбінаторну залежність кутів установки лопаток направляючих апаратів і поворотних лопатей другого ряду для максимізації ККД та мінімізації втрат.

Фінальною метою є експериментальна валідація результатів моделювання на фізичному прототипі, що дозволить підтвердити практичну цінність розробки та сприятиме її впровадженню в гідроенергетику.

Висновки. За результатами виконаного дослідження, присвяченого чисельному аналізу підвідної частини нової радіально-діагональної гідротурбіни, можна зробити наступні висновки:

1. На основі раніше розробленої повної 3D-моделі було створено детальну геометричну модель підвідної частини гідротурбіни (спіральна камера, статор та направляючий апарат), яка була використана як розрахункова область для CFD-аналізу.

2. Проведено чисельне моделювання стаціонарного турбулентного потоку в програмному комплексі Ansys CFX. Аналіз отриманих полів швидкостей і тисків показав, що спроектована підвідна частина забезпечує рівномірне, стабільне та поступове прискорення потоку, формуючи сприятливі умови на вході до робочого колеса.

3. Візуалізація ліній току підтвердила відсутність значних вихрових зон та областей відриву потоку в досліджуваній області, що свідчить про високу гідродинамічну якість конструкції.

4. Кількісна оцінка показала, що сумарні гідравлічні втрати повного тиску в підвідній частині становлять 4,7 %, що є прийнятним показником для високонапірних гідротурбін і підтверджує ефективність обраних проектних рішень.

Результати даної роботи є важливим етапом валідації нової конструкції та слугують основою для подальшого, більш комплексного аналізу.

Список літератури

1. *Hydropower* – IEA. URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity> (дата звернення: 07.11.2025).

2. Сокол С., Черкашенко М., Потетенко О., Дранковський В., Гасюк О., Гриб О. *Гідроенергетика. Том 2. Гідравлічні машини*. Харків : Промарт, 2020. 534 с.
3. *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: 07.11.2025).
4. *Hydropower Trends 2025: Detailed Exploration of Innovations*. URL: <https://energyevolutionconference.com/hydropower-trends-2025> (дата звернення: 07.11.2025).
5. Крупа С. С., Демчук Р. М., Кісь С. Л. Розробка радіально-діагональної гідротурбіни. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025 (14–17 травня 2025 р., Харків)*. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 257.
6. Крупа С. С., Демчук Р. М. Розробка конструкції радіально-діагональної гідротурбіни для ефективної роботи на високих напорах. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2025. No. 1. P. 33–37. doi: 10.20998/2411-3441.2025.1.05
7. Потетенко О. В., Дранковський В. Е., Ковальов С. М., Крупа С. С., Вахрушева О. С., Шевченко Н. Г. Тенденції просування горизонтальних прямокутних і вертикальних радіально-осьових гідротурбін на високі напори з широким діапазоном експлуатації. *Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки*. Суми : СумДУ. 2010. № 3. С. 125–135.
8. Gupta A. CFD Analysis in Francis Turbine Performance – A Review. *Journal of Advanced Mechanical Sciences*. 2022. Vol. 1, no. 1. P. 31–35.
9. *Ansys CFX | Industry-Leading CFD Software*. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> (дата звернення: 10.11.2025).
10. Pinto R., Afzal A., D'Souza L. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Vol. 24, P. 467–479. doi: 10.1007/s11831-016-9175-2
11. Černý J, Polák M. Optimization of Ansys CFX Input Parameters for Numerical Modeling of Pump Performance in Turbine Operation. *Processes*. 2024. Vol. 12, issue 9. P. 2034. doi: 10.3390/pr12092034
12. Krupa Ye., Demchuk R. Numerical study of flow parameters in the high-head Francis turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 1. P. 44–50. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.06
13. Aradag S., Akin H., Celebioglu K. CFD Based Design of a 4.3 MW Francis Turbine for Improved Performance at Design and Off-Design Conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31. P. 5041–5049. doi: 10.1007/s12206-017-0952-0
14. Lazarevikj M., Stojkovski F., Markov Z., Iliev I., Dahlhaug O. G. Parameter based tool for Francis turbine guide vanes design using coupled MATLAB – ANSYS approach. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2022. Vol. 10, issue 3. P. 1090410. doi: 10.13044/j.sdewes.d9.0410
3. *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 07.11.2025).
4. *Hydropower Trends 2025: Detailed Exploration of Innovations*. Available at: <https://energyevolutionconference.com/hydropower-trends-2025> (accessed 07.11.2025).
5. Krupa Ye. S., Demchuk R. M., Kis' S. L. Rozrobka radial'no-diahonal'noyi hidroturbiny [Development of a radial-diagonal hydraulic turbine]. *Informatsiyini tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezy dopovidey XXXIII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD-2025 (14–17 travnya 2025 r., Kharkiv)* [Information technologies: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXXIII Int. Sci.-Pract. Conf. (14–17 May 2025, Kharkiv)]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025, p. 257.
6. Krupa Ye. S., Demchuk R. M. Rozrobka konstrukttsiyi radial'no-diahonal'noyi hidroturbiny dlya efektyvnoyi roboty na vysokyykh naporakh [Development of a radial-diagonal hydroturbine design for efficient operation at high heads]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025, no. 1, pp. 33–37. doi: 10.20998/2411-3441.2025.1.05
7. Potetenko O. V., Drankovskyy V. E., Koval'ov S. M., Krupa Ye. S., Vakhrusheva O. S., Shevchenko N. H. Tendentsiyi prosuvannya horizontal'nykh pryamotochnykh i vertykal'nykh radial'no-os'ovykh hidroturbyn na vysokiy napory z shyrokym diapazonom ekspluatatsiyi [Trends in the promotion of horizontal direct-flow and vertical radial-axial hydraulic turbines for high heads with a wide range of operation]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin. Series: Technical sciences]. Sumy, SumDU Publ., 2010, no. 3, pp. 125–135.
8. Gupta A. CFD Analysis in Francis Turbine Performance – A Review. *Journal of Advanced Mechanical Sciences*. 2022, vol. 1, no. 1, pp. 31–35.
9. *Ansys CFX | Industry-Leading CFD Software*. Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> (accessed 10.11.2025).
10. Pinto R., Afzal A., D'Souza L. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017, vol. 24, pp. 467–479. doi: 10.1007/s11831-016-9175-2
11. Černý J, Polák M. Optimization of Ansys CFX Input Parameters for Numerical Modeling of Pump Performance in Turbine Operation. *Processes*. 2024, vol. 12, issue 9, p. 2034. doi: 10.3390/pr12092034
12. Krupa Ye., Demchuk R. Numerical study of flow parameters in the high-head Francis turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1, pp. 44–50. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.06
13. Aradag S., Akin H., Celebioglu K. CFD Based Design of a 4.3 MW Francis Turbine for Improved Performance at Design and Off-Design Conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017, vol. 31, pp. 5041–5049. doi: 10.1007/s12206-017-0952-0
14. Lazarevikj M., Stojkovski F., Markov Z., Iliev I., Dahlhaug O. G. Parameter based tool for Francis turbine guide vanes design using coupled MATLAB – ANSYS approach. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2022, vol. 10, issue 3, p. 1090410. doi: 10.13044/j.sdewes.d9.0410

References (transliterated)

1. *Hydropower – IEA*. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity> (accessed 07.11.2025).
2. Sokol Ye., Cherkashenko M., Potetenko O., Drankovskyy V., Hasyuk O., Hryb O. *Hidroenerhetyka. Tom 2. Hidravlichni mashyny* [Hydropower engineering. Vol. 2. Hydraulic machines]. Kharkiv, Promart Publ., 2020. 534 p.

Hadziuua (received) 21.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Крупа Євгеній Сергійович (Krupa Evgeniy) – 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/0000-0003-3997-3590>; e-mail: zhekr@ukr.net

Демчук Роман Миколайович (Demchuk Roman) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3229-0395>; e-mail: roman.demchuk@mit.khpi.edu.ua