

Є. С. КРУПА, Р. М. ДЕМЧУК

## РОЗРОБКА НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ КАПСУЛЬНИХ ГІДРОТУРБІН

Розглянуто ключові аспекти та шляхи підвищення енергетичної та експлуатаційної ефективності гідротурбінного обладнання гідроелектростанцій. Здійснено детальний аналіз напрямків удосконалення основних показників, які характеризують переваги лопатевих гідротурбін горизонтального типу. Особливу увагу приділено прямоточним поворотно-лопатевим гідротурбінам з горизонтальним розташуванням осі обертання гідроагрегату. Зазначено, що ці гідротурбіни володіють значущими перевагами порівняно з турбінами, які використовують спіральну камеру для подачі води, зокрема високою пропускною здатністю та широким діапазоном експлуатації по напорам та витратам. Основний акцент авторами статті зроблено на перевагах прямоточних капсульних гідротурбін та їхньому потенційному використанні при високих напорах. Недоліком існуючих прямоточних гідроагрегатів є те, що вони працюють на низьких напорах до 25 м, тому необхідно займатися розробкою нових конструкцій гідротурбін даного типу. В роботі розглянуто нові конструктивні рішення, на які отримано патенти України, спрямовані на ефективне використання горизонтальних капсульних гідроагрегатів на вищих напорах, до 280 м, з розширенням зони надійної експлуатації. Висвітлена проблематика підвищення енергетичних та експлуатаційних показників гідротурбінного обладнання гідроелектростанцій ставить перед дослідниками важливі завдання щодо оптимізації конструкцій та покращення їхньої ефективності. Запропоновано рекомендації щодо проведення чисельного моделювання в програмах CFD (Computational Fluid Dynamics). Застосування CFD в даному контексті забезпечує детальне розуміння гідродинамічних процесів в проточних частинах гідротурбін, що є ключовим фактором у їх удосконаленні. Такий інтегрований підхід до дослідження, який включає в себе як експериментальні, так і чисельні методи, сприятиме розробці ефективних та надійних гідротурбін, відповідно до сучасних вимог сталого розвитку енергетики.

**Ключові слова:** капсульна гідротурбіна, робоче колесо, направляючий апарат, сопловий апарат, комбінаторна залежність, коефіцієнт корисної дії.

Y. KRUPA, R. DEMCHUK

## DEVELOPMENT OF NEW DESIGNS OF HORIZONTAL BULB HYDROTURBINES

The key aspects and methods of increasing the energy and operational efficiency of hydraulic turbine equipment at hydroelectric power plants are considered. A detailed analysis of directions for improving the main indicators characterizing the advantages of horizontal-type bladed hydraulic turbines has been carried out. Particular attention is paid to direct-flow rotary-blade hydraulic turbines with a horizontal axis of rotation for the hydraulic unit. These hydraulic turbines offer significant advantages over those using a spiral casing for water supply, including high throughput and a wide range of operating pressures and flow rates. The focus of the article is on the advantages of direct-flow bulb hydraulic turbines and their potential use at high pressures. However, existing direct-flow hydraulic units operate at low heads of up to 25 m. Therefore, there is a need to develop new designs for these turbines to operate efficiently at higher heads up to 280 m, expanding the reliable operation zone. The paper examines new design solutions for which Ukrainian patents have been received, aiming at the effective use of horizontal bulb hydraulic units. The text highlights the problems of increasing the energy and operational performance of hydraulic turbine equipment at hydroelectric power plants, presenting important tasks for researchers to optimize structures and improve efficiency. Recommendations for carrying out numerical modeling in CFD (Computational Fluid Dynamics) programs are proposed to provide a detailed understanding of hydrodynamic processes in the flow parts of hydraulic turbines. The purpose of numerical modeling is to evaluate the efficiency and productivity of new hydroturbines in different operating modes. This includes analyzing the pressure distribution, flow rate and other characteristics inside the turbine. The obtained data will allow to identify potential "weak" points and optimize the blading and other structural elements for maximum efficiency. This integrated research approach, including both experimental and multiple methods, will contribute to the development of efficient and reliable hydroturbines in line with modern requirements for sustainable energy development.

**Keywords:** bulb hydraulic turbine, runner, wicket gate, nozzle diaphragm, cate-blade relationship, efficiency.

**Вступ.** Сучасне енергетичне виробництво зіштовхується з постійною потребою у вдосконаленні технологій, особливо в області гідравлічних турбін. Ефективність енергетичних систем напряму залежить від продуктивності використовуваних турбін, тому розробка нових типів гідравлічних турбін стає ключовим фактором у забезпеченні стійкого та ефективного виробництва енергії [1–2].

Одним з головних напрямків в цій сфері є підвищення ефективності роботи гідротурбін. З розвитком технологій та наукових досліджень, необхідно продовжувати роботу над розробкою нових типів гідравлічних турбін. Це пов'язано з тим, що нові технології можуть забезпечити більшу ефективність виробництва електроенергії, менше витрат на утримання та експлуатацію, а також зниження впливу на навколишнє середовище. Це особливо важливо в умовах постійно зростаючого попиту на енергію та прагнення зменшення залежності від традиційних

джерел енергії.

Створення нових конструкцій гідравлічних турбін вимагає глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються під час їх роботи. Унікальні форми лопатевих систем, оптимізовані для конкретних умов, а також інноваційні методи управління потоком води стають ключовими аспектами у підвищенні ефективності гідравлічних турбін [2–6].

Крім того, з урахуванням зростаючої кількості гідроенергетичних станцій та їх розвитку у різних країнах світу, виникає потреба у розробці гідравлічних турбін, які відповідають різним кліматичним та географічним умовам. Наприклад, гідроелектростанції в умовах високих гір або в областях з низьким рівнем води потребують гідравлічних турбін з відповідними параметрами та характеристиками [1–3].

**Мета дослідження** полягає в глибокому

розкритті потенціалу та визначенні оптимальних шляхів вдосконалення горизонтальних капсульних гідротурбін. В результаті цього дослідження виявлено нові можливості для підвищення ефективності гідротурбін, що в свою чергу сприятиме подальшому розвитку та удосконаленню галузі відновлювальної енергетики.

**Переваги горизонтальних капсульних гідротурбін.** Сучасні ГЕС із горизонтальними капсульними гідроагрегатами (рис. 1) вже успішно функціонують у різних частинах світу. Важливо, що вони можуть бути встановлені як у великих річках, так і на дрібних водотоках, що розширює область їх застосування [1–8].

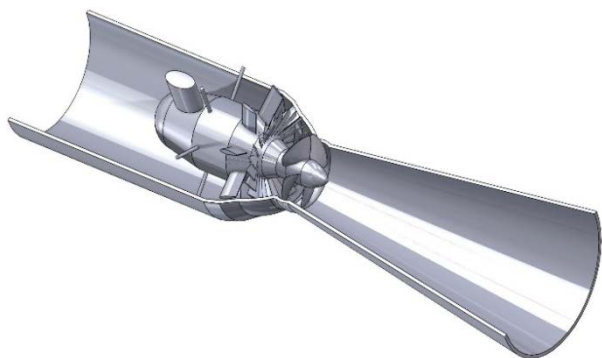


Рис. 1. Прямоточний капсульний гідроагрегат

На даний момент перспективним напрямком у сучасному гідротурбобудуванні є розробка горизонтальних прямоточних гідроагрегатів з високими коефіцієнтами швидкохідності, для їх застосування більш високі напори [6–8].

Застосування прямоточних гідроагрегатів на напори понад 40 м зустрічає ряд проблем гідродинамічного характеру, міцності конструкцій, а також проблем надійної експлуатації. Однак ці труднощі і проблеми можна вирішити, а переваги, що отримуються від застосування прямоточних агрегатів, незаперечні.

**Ефективність та продуктивність.** Однією з ключових переваг горизонтальних капсульних гідротурбін (ГКГТ) є їх висока ефективність та продуктивність. Ці турбіни спроектовані так, щоб максимально використати енергію потоку води. Їх горизонтальне положення та конструкція з поворотними лопатями дозволяють забезпечувати стабільне та надійне виробництво електроенергії [4–8].

Перевага ГКГТ полягає також у їхній здатності працювати в широкому діапазоні швидкостей потоку води. Це означає, що вони можуть ефективно функціонувати як на річках з повільною течією, так і більш швидких водотоках. Ефективність ГКГТ робить їх привабливим вибором для різноманітних проектів гідроенергетики.

Прямоточні (капсульні) гідроагрегати (рис. 1), такі як на Київській ГЕС, Канівській ГЕС та ін., незважаючи на складність конструкції та велику металомісткість, мають суттєві переваги в порівнянні з гідротурбінами зі спіральним підведенням води [6]:

- на 30–40 % більш висока пропускна здатність,

що дозволяє при тому ж діаметрі робочого колеса підвищити потужність на 30–40 % або зменшити діаметр робочого колеса при тій же потужності і отримати суттєву економію габариту ГЕС у плані та металоемності арматури, що закладається в бетон;

- вищий ККД в оптимумі і значно вищий середньоексплуатаційний ККД (на 5–10 %);

- більш широкий діапазон експлуатації за напорами та витратами, ширшу маневреність при пуску та зупинці гідроагрегату, що важливо при роботі на пікових навантаженнях;

- більш стабільну роботу гідроагрегату на режимах, відмінних від оптимального в широких діапазонах зміни витрати (потужності) та напору;

- нижчий рівень нестационарності потоку.

**Компактність та низьке навантаження на інфраструктуру.** ГКГТ мають компактний дизайн, що робить їх придатними для встановлення в обмежених просторах. Це особливо важливо для проектів МГЕС на малих річках. Компактність ГКГТ дозволяє максимально використовувати ресурси та знизити навантаження на інфраструктуру [6, 7].

Крім того, встановлення ГКГТ потребує меншого об'єму будівельних робіт, порівняно з ГЕС, де використовуються вертикальні гідротурбіни. Це знижує вплив на довкілля та зменшує витрати на будівництво та обслуговування. Їхня висока ефективність та низькі експлуатаційні витрати роблять їх привабливим варіантом для інвесторів та операторів гідроелектростанцій.

**Нові конструктивні рішення горизонтальних капсульних гідротурбін.** Для розробки нових типів гідравлічних турбін необхідно проводити науково-дослідні роботи та впроваджувати нові технології.

На кафедрі «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» НТУ «ХПІ» ведеться активна робота щодо розробки нових типів гідравлічних турбін. Основоположником цього напрямку став професор Олег Васильович Потетенко. За останні роки кафедрою гідромашин було отримано десятки патентів України на нові конструкції гідротурбін [6–10].

Розглянемо дві нових конструкції горизонтальних капсульних гідротурбін, на які було отримано патенти України на корисну модель [9, 10].

Дані корисні моделі відносяться до галузі гідромашинобудування і можуть бути використані на гідроелектростанціях.

Відомі гідроагрегати обладнані гідротурбінами поворотно-лопатевого типу, що включають спіральну камеру, статор, направляючий апарат та робоче колесо поворотно-лопатевого діагонального типу, застосовувані на напори від 40 до 170 м [11].

Такі гідротурбіни мають високі енергокавітаційні й експлуатаційні показники в порівнянні з жорстколопатовими радіально-осьовими гідротурбінами, які застосовуються на високі напори.

Недоліком у порівнянні з прямоточними горизонтальними гідроагрегатами є більш низька пропускна спроможність цих гідротурбін та більші розміри блоку гідроагрегату в плані, менш широкий діапазон надійної експлуатації по напорам та

витратам.

Відомі гідроагрегати горизонтально-капсульного типу з прямоосним проточним трактом, застосовувані на низьконапірних ГЕС з  $H = 3\text{--}25$  м [7].

Ці гідроагрегати внаслідок прямоосного підведення й відведення води і простоти форми проточного тракту при установці на низьконапірних ГЕС мають переваги перед гідроагрегатами з вертикальними поворотно-лопатеви́ми гідротурбінами (як по пропускній здатності і частоті, так і за енергетичними показниками). При цьому габаритні розміри гідротурбінного блоку значно менші, ніж в осевих вертикальних поворотно-лопатеви́х гідротурбінах.

Недоліком існуючих прямооточних гідроагрегатів з турбінами такого типу є те, що вони працюють на низьких напорах до 25 м. Це пов'язано з тим, що в цих гідротурбінах відсутня спіральна камера, а момент кількості руху перед робочим колесом горизонтально-прямоточної гідротурбіни створюється колонами статора і направляючим апаратом, установленим перед робочим колесом. Тому забезпечити перед робочим колесом необхідний високий рівень моменту кількості руху тільки за рахунок статора і направляючого апарату неможливо [7].

В основу корисної моделі [9] поставлена задача підвищення середньоексплуатаційних, енергокавітаційних показників і надійності експлуатації прямооточних горизонтальних гідроагрегатів, розширення зони експлуатації по напорам аж до 270–280 м.

Поставлена задача досягається тим, що в турбіні перед направляючим апаратом встановлюється сопловий підвідний орган гідротурбіни, що представляє собою ряд спеціально спрофільованих криволінійних (спіральних) конфузорних соплових каналів, які розміщені по колу перед лопатками направляючого апарату, що забезпечують необхідний момент кількості руху для оптимальної роботи гідротурбіни при напорах до 270–280 м та рівномірним по окружному напрямку і по висоті направляючого апарату підводом потоку до робочого колеса діагонального жорстко-лопатевого пропелерного та поворотно-лопатевого осевого типу, що спрацьовує підвищений напір. Лопатки соплових апаратів при цьому грають також роль колон статора, що забезпечує надійну опору гідроагрегату [9].

На рис. 2 показано меридіональний перетин горизонтального прямооточного гідроагрегату; на рис. 3 представлено сопловий конфузорний канал в плані.

Горизонтальний прямооточний гідроагрегат включає в себе металічну капсулу або бетонну колону 1, в якій розташовуються генератор електричного струму, підшипники, під'ятник, допоміжне обладнання; сопловий конфузорний підвідний орган 2; лопатки направляючого апарату 3; робоче колесо діагонально-осевого типу 4; відсмоктуючу трубу прямоосного типу 5.

Горизонтальний прямооточний гідроагрегат з діагонально-осевим робочим колесом складається з

гідротурбінного і електрогенераторного обладнання.

Гідравлічна турбіна являється приводом генератора електричного струму, перетворюючи енергію потоку води в механічну енергію обертання ротора генератора та працює наступним чином [9].

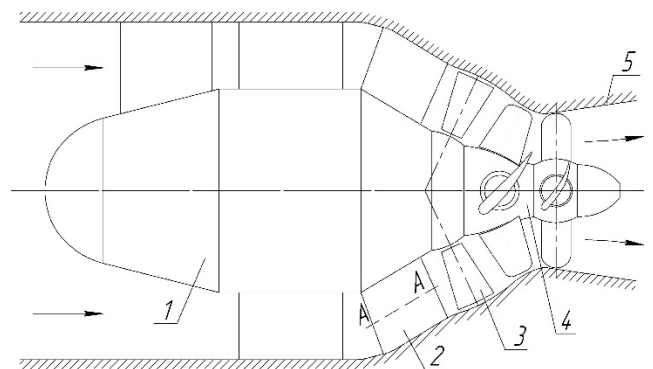


Рис. 2. Високонапірний горизонтальний прямооточний гідроагрегат з діагонально-осевим робочим колесом

Перетин А-А

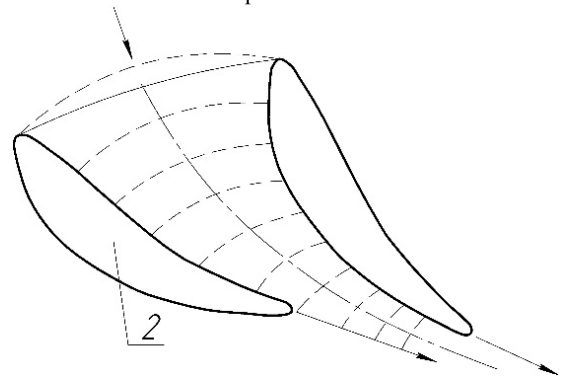


Рис. 3. Сопловий підвідний орган

Потік води з певним напором і витратою підводиться в область соплового підвідного органу 2. В конфузорних, спеціально спрофільованих соплових каналах, що розміщені по колу перед направляючим апаратом, збільшується меридіональна та окружна складова швидкості потоку, створюючи необхідний для оптимальної роботи гідротурбіни момент кількості руху потоку та рівномірність в окружному напрямку й висоті направляючого апарату, забезпечуючи високі енергокавітаційні показники гідротурбіни. Далі потік поступає через міжлопаточні канали направляючого апарату 3, що являється регулюючим (витрату, а відповідно й потужність) органом, в міжлопатеви́ канали робочого колеса діагонально-осевого типу 4. При цьому розворот лопатей робочого колеса здійснюється за рахунок системи регулювання у відповідності до комбінаторної залежності від величини відкриття лопаток направляючого апарату, забезпечуючи мінімальні втрати енергії. Далі потік з мінімальними втратами відводиться в нижній б'єф прямоосною відсмоктуючою трубою 5.

Наступна конструкція [10] відрізняється тим, що сопловий конфузорний підвідний орган, на відміну від вище приведеної гідротурбіни, має поворотні вихідні елементи (рис. 4, 5).

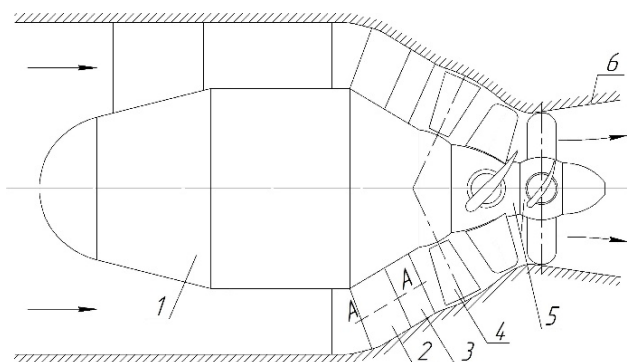


Рис. 4. Високонапірний горизонтальний прямоточний гідроагрегат з діагонально-осьовим робочим колесом

Перетин А-А

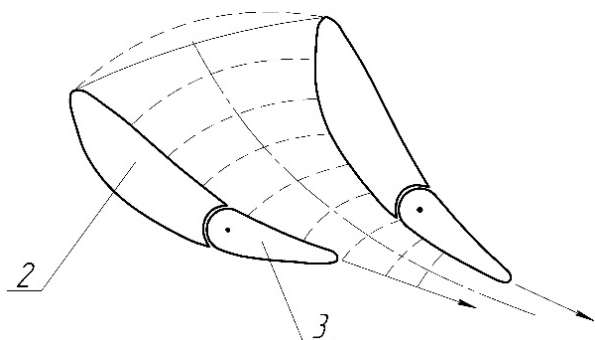


Рис. 5. Сопловий підвідний орган з поворотними вихідними елементами

На рис. 4 показаний меридіональний перетин горизонтального прямоточного гідроагрегату; на рис. 5 представлено сопловий конфузорний канал в плані.

Горизонтальний прямоточний гідроагрегат включає в себе металічну капсулу або бетонну колону 1, в якій розташовуються генератор електричного струму, підшипники, під'ятник, допоміжне обладнання; сопловий конфузорний підвідний орган 2 з поворотними вихідними елементами 3; лопатки направляючого апарату 4; робоче колесо діагонально-осьового типу 5; відсмоктуючу трубу прямоосного типу 6.

Представлена гідротурбіна працює наступним чином. Потік води проходить через канали соплових апаратів. Лопатки соплових апаратів з поворотними вихідними елементами (кромками) виконують функцію регулювання витрати (потужності) гідротурбіни [10].

Далі потік поступає через міжлопаточні канали направляючого апарату в міжлопатеві канали робочого колеса діагонально-осьового типу. При цьому розворот лопатей осьового типу здійснюється за рахунок системи регулювання у відповідності до трьохелементної комбінаторної залежності кута розвороту осьового типу лопатей від розвороту вихідних елементів лопаток соплових апаратів та відкриття лопаток направляючого апарату, забезпечуючи мінімальні втрати енергії. Далі потік з мінімальними втратами відводиться в нижній б'єф прямоосною відсмоктуючою трубою.

Таким чином, застосування прямоточних горизонтальних гідроагрегатів з діагонально-осьовим робочим колесом на більш високі напори (до 270–280 м) [9, 10] дозволяє розповсюдити переваги цих агрегатів, такі як більш висока пропускна спроможність, що забезпечує більшу потужність турбіни при тому ж діаметрі робочого колеса, більш високі енергокавітаційні показники та надійність експлуатації, на вищезазначені напори.

**Рекомендації щодо чисельного моделювання потоку в нових конструкціях горизонтальних капсульних гідротурбін.** Інноваційні конструкції горизонтальних капсульних гідротурбін, на які були отримані дані патенти, є значущим кроком у розвитку енергетичної індустрії [9, 10]. Однак, незважаючи на успішне проектування, ці конструкції знаходяться на етапі розробки, і для їх оптимізації та удосконалення проведення чисельного моделювання потоку в їх проточних частинах стає необхідним етапом.

Чисельне моделювання виконується з використанням сучасних програмних комплексів CFD (Computational Fluid Dynamics), які дозволяють аналізувати та оптимізувати характеристики потоку в різних умовах. Застосування CFD в даному контексті забезпечує детальне розуміння гідродинамічних процесів всередині гідротурбін, що є ключовим фактором у їх удосконаленні [12, 13].

Метою чисельного моделювання є оцінка ефективності та продуктивності нових гідротурбін в різних режимах роботи. Це включає аналіз розподілу тиску, швидкості потоку та інших характеристик всередині турбіни.

Отримані дані дозволяють виявити потенційні «слабкі» місця та оптимізувати форму лопатевих систем та інших елементів конструкції для максимальної ефективності [12, 13].

Використання сучасних технологій чисельного моделювання відкриває нові перспективи для створення ефективних та надійних гідротурбін.

**Висновки.** 1. Розробка горизонтальних прямоточних гідроагрегатів з високими коефіцієнтами швидкохідності, для їх застосування на більш високі напори, є перспективним напрямком сучасного гідротурбобудування.

2. Застосування запатентованих конструкцій прямоточних гідроагрегатів з діагонально-осьовим робочим дозволить ефективно використовувати горизонтальні гідротурбіни на напори до 280 м.

3. Представлені нові конструкції гідротурбін знаходяться на стадії розробки, і для їх оптимізації доцільно використовувати чисельне моделювання потоку із застосуванням сучасних програмних комплексів CFD.

#### Список літератури

1. Pandey B., Karki A. *Hydroelectric Energy: Renewable Energy and the Environment*. Wallingford, United Kingdom: CRC Press, 2016. 419 p.
2. Spellman F. R. *Environmental Engineering*. Florida: CRC Press, 2015. 750 p.
3. Caldwell J. *Hydropower: Renewable Energy Essentials*. United States: Larsen and Keller Education, 2019. 257 p.

4. Сокол С., Черкашенко М., Потетенко О., Дранковський В., Гасюк О., Гриб О. *Гідроенергетика. Том 2. Гідравлічні машини*. Харків: Промарт, 2020. 534 с.
5. Ландау Ю. А. Основные тенденции развития гидроэнергетики Украины. *Научные работы*. Харьков. 2014. Т. 53, вып. 40. С. 82–86.
6. Потетенко О. В., Дранковський В. Е., Ковальов С. М., Крупа С. С., Вахрушева О. С., Шевченко Н. Г. Тенденції просування горизонтальних прямооточних і вертикальних радіально-осьових гідротурбін на високі напори з широким діапазоном експлуатації. *Вісник Сумського державного університету. Сер.: Технічні науки*. Суми: СумДУ. 2010. № 3. С. 125–135.
7. Krupa Y. Development of horizontal bulb hydroturbines for high heads with a wide range of reliable operation modes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 2. P. 33–38.
8. Дранковський В. Е., Тиньянова І. І., Дюжев В. Г., Резва К. С. Інноваційний підхід до розробки нових схем горизонтальних прямооточних гідротурбін. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 2. P. 66–70.
9. Черкашенко М. В., Потетенко О. В., Крупа С. С., Гасюк О. І. Пат. 147849, Україна. *Високонапірний горизонтальний прямооточний гідроагрегат*. 2021.
10. Черкашенко М. В., Потетенко О. В., Крупа С. С., Гасюк О. І., Яковлева Л. К. Пат. 147850, Україна. *Високонапірний горизонтальний прямооточний гідроагрегат з діагонально-осьовим робочим колесом*. 2021.
11. Черкашенко М. В., Потетенко О. В., Крупа С. С., Гасюк О. І. Пат. 139840, Україна. *Високонапірний горизонтальний прямооточний гідроагрегат з діагонально-осьовим робочим колесом*. 2020.
12. 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. No. 24. P. 467–479.
13. Keck H., Sick M. Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbomachines. *Acta Mechanica*. 2008. No. 201. P. 211–229.
- Hasyuk O., Hryb O. *Hidroenerhetyka. Tom 2. Hidravlichni mashyny* [Hydropower engineering. Vol. 2. Hydraulic machines]. Kharkiv, Promart Publ., 2020. 534 p.
5. Landau Yu. A. Osnovnye tendentsii razvitiya gidroenergetiki Ukrainy [The main trends in the development of hydropower in Ukraine]. *Nauchnye raboty*. Kharkov, 2014, vol. 53, issue 40, pp. 82–86.
6. Potetenko O. V., Drankovs'kyu 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 hidroturbin na vysoki 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.
7. Krupa Y. Development of horizontal bulb hydroturbines for high heads with a wide range of reliable operation modes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 2, pp. 33–38.
8. Drankovs'kyu V. E., Tyn'yanova I. I., Dyuzhev V. H., Ryezva K. S. Innovatsiynyy pidkhdid do rozrobky novykh skhem horyzontal'nykh pryamotochnykh hidroturbin [An innovative approach to the development of new schemes of horizontal direct-flow hydraulic turbines]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 2, pp. 66–70.
9. Cherkashenko M. V., Potetenko O. V., Krupa Ye. S., Hasyuk O. I. *Vysokonapirnyy horizontal'nyy pryamotochnyy hidroahrehat* [High-head horizontal direct-flow hydraulic unit]. Patent UA, no. 147849, 2021.
10. Cherkashenko M. V., Potetenko O. V., Krupa Ye. S., Hasyuk O. I., Yakovlyeva L. K. *Vysokonapirnyy horizontal'nyy pryamotochnyy hidroahrehat z diahonal'no-os'ovym robochym kolesom* [High-head horizontal direct-flow hydraulic unit with a diagonal-axial runner]. Patent UA, no. 147850, 2021.
11. Cherkashenko M. V., Potetenko O. V., Krupa Ye. S., Hasyuk O. I. *Vysokonapirnyy horizontal'nyy pryamotochnyy hidroahrehat z diahonal'no-os'ovym robochym kolesom* [High-head horizontal direct-flow hydraulic unit with a diagonal-axial runner]. Patent UA, no. 139840, 2020.
12. 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, no. 24, pp. 467–479.
13. Keck H., Sick M. Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbomachines. *Acta Mechanica*. 2008, no. 201, p. 211–229.

#### References (transliterated)

1. Pandey B., Karki A. *Hydroelectric Energy: Renewable Energy and the Environment*. Wallingford, United Kingdom, CRC Press Publ., 2016. 419 p.
2. Spellman F. R. *Environmental Engineering*. Florida, CRC Press Publ., 2015. 750 p.
3. Caldwell J. *Hydropower: Renewable Energy Essentials*. United States, Larsen and Keller Education Publ., 2019. 257 p.
4. Sokol Ye., Cherkashenko M., Potetenko O., Drankovs'kyu V.,

Надійшла (received) 01.11.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Крупа Євгеній Сергійович (Krupa Yevhenii)** – 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