

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

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОБОРОТНИХ ГІДРОМАШИН МЕТОДОМ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто процес проектування та оптимізації робочого колеса відцентрового насоса, що є проміжною стадією проектування оборотної гідромашини гідроакумулюючої електростанції. Потреба підвищення енергоефективності та надійності гідроагрегатів, що працюють у насосному режимі при високих напорах є актуальною задачею. Методика дослідження базується на комплексному застосуванні програмних засобів Ansys: Vista CPD для попереднього проектування, BladeGen для генерації лопатей, TurboGrid для побудови сітки та CFX для числового розрахунку тривимірної течії. На першому етапі отримано базову геометрію робочого колеса та виконано CFD-аналіз, який виявив характерні проблеми: підвищення меридіональної швидкості до 30 м/с у звуженій зоні каналу та різкий перепад тиску на задній кромці лопаті. Це призводило до зростання гідравлічних втрат і підвищення ризику кавітації. На другому етапі проведено модифікацію проточної частини в меридіональній площині шляхом локального розширення каналу, що знизило нерівномірність розподілу швидкості. На третьому етапі оптимізовано профіль лопаті за рахунок зменшення товщини біля задньої кромки та корекції кута входу потоку. Порівняння картин течії та інтегральних показників роботи трьох варіантів показало, що модифікація 2 забезпечує найкращі результати: більш рівномірний розподіл швидкості, стабільніший тиск вздовж лопаті, зменшення вихрових структур та локальних прискорень. Згідно з розрахунками, тиск на виході підвищився з 4,23 до 4,35 МПа, загальний напір – з 588 до 621 м, а ККД – з 0,927 до 0,952. Таким чином, застосований евристичний підхід дозволяє суттєво підвищити енергетичну ефективність робочого колеса та може бути використаний для оптимізації оборотних гідромашин високонапірних ГАЕС.

Ключові слова: відцентровий насос, насосний режим, числове моделювання, течія, ефективність, математичне моделювання.

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

OPTIMIZATION OF THE IMPELLER OF A CENTRIFUGAL PUMP FOR PUMP-TURBINE HYDROMACHINES USING NUMERICAL MODELING

The article discusses the process of designing and optimizing the impeller of a centrifugal pump, which is an intermediate stage in the design of a reversible hydraulic machine for a pumped storage power plant. The need to improve the energy efficiency and reliability of hydraulic units operating in pump mode at high pressures is a pressing issue. The research methodology is based on the comprehensive use of Ansys software: Vista CPD for preliminary design, BladeGen for blade generation, TurboGrid for mesh generation, and CFX for numerical calculation of three-dimensional flow. At the first stage, the basic geometry of the impeller was obtained and a CFD analysis was performed, which revealed characteristic problems: an increase in meridional velocity to 30 m/s in the narrowed zone of the channel and a sharp pressure drop at the rear edge of the blade. This led to an increase in hydraulic losses and an increased risk of cavitation. At the second stage, the flow part in the meridional plane was modified by locally expanding the channel, which reduced the unevenness of the velocity distribution. At the third stage, the blade profile was optimized by reducing the thickness at the trailing edge and correcting the flow entry angle. A comparison of the flow patterns and integral performance indicators of the three options showed that modification 2 provided the best results: more uniform velocity distribution, more stable pressure along the blade, and a reduction in vortex structures and local accelerations. According to calculations, the outlet pressure increased from 4.23 to 4.35 MPa, the total head from 588 to 621 m, and the efficiency from 0.927 to 0.952. Thus, the heuristic approach used allows for a significant increase in the energy efficiency of the impeller and can be used to optimize the reversible hydraulic machines of high-pressure pumped storage power plants.

Keywords: centrifugal pump, pumping mode, numerical modeling, flow, efficiency, mathematical modeling.

Вступ. Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС) є одним із найефективніших засобів балансування енергосистем, особливо в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які характеризуються непостійністю генерації [1]. Основу таких станцій складають оборотні гідромашини, що працюють у двох режимах: турбіни для виробництва електроенергії у години пікового навантаження та насоса для перекачування води у періоди профіциту енергії [2]. Ефективність їх роботи визначає економічні показники ГАЕС та її роль у забезпеченні стійкості енергосистеми, а підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) агрегатів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень [3].

Проблематика оптимізації оборотних машин ускладнюється тим, що гідродинамічні умови в насосному та турбінному режимах значно відрізняються. Це зумовлює компромісність конструктивних рішень і необхідність досягнення прийняттого ККД у широкому діапазоні режимів [4]. Особливої уваги потребують ГАЕС з високими напорами, де втрати енергії через відривні зони,

вихрові структури та неузгодженість потоку між проточною частиною і спіральною камерою можуть суттєво знижувати ефективність [5]. Крім того, підвищені швидкості течії збільшують ризик розвитку кавітаційних явищ, що негативно позначається на довговічності агрегатів [6].

За останні десятиліття сформувався комплекс підходів до вирішення цих завдань. По-перше, удосконалюється геометрія лопатевих систем та елементів проточної частини, що дозволяє мінімізувати локальні втрати [7]. По-друге, активно застосовуються методи комп'ютерної гідродинаміки (CFD), які забезпечують можливість вивчення складних турбулентних структур та оптимізації конструкції на основі чисельних експериментів [8]. По-третє, у дослідженнях дедалі ширше впроваджуються методи глобальної оптимізації, включно з еволюційними алгоритмами та технологіями машинного навчання, які дозволяють знаходити компромісні рішення між ефективністю у насосному й турбінному режимах [9].

Таким чином, дослідження, спрямовані на

підвищення ККД оборотних гідромашин для ГАЕС з високим напором, 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. Поєднання методів попереднього проектування та тривимірного чисельного моделювання течії рідини у насосах є найбільш ефективним підходом до створення вискоефективних відцентрових насосів [10]. Vista CPD зазвичай застосовують для швидкої генерації початкових геометричних рішень, які далі уточнюються у процесі параметричної оптимізації із використанням обчислювальної гідродинаміки [11].

В статтях [12–14] зазначено, що основні гідравлічні втрати виникають у зонах високого навантаження біля кореня лопаті, у міжлопатевому просторі та на виході робочого колеса у спіральний відвід. Саме тому зміна геометрії лопаті та перерозподіл меридіональної швидкості дозволяють суттєво зменшити втрати і підвищити коефіцієнт корисної дії.

Однією з проблем підвищення ефективності робочого колеса відцентрового насоса є необхідність одночасної оптимізації за декількома параметрами: за ефективністю, за кавітаційними властивостями та за роботою у позарозрахункових режимах [15; 16]. В останні роки широкого розповсюдження отримали методи параметризації меридіональної кривої та еволюційних алгоритмів. Доведено, що поєднання корекції меридіонального профілю із регулюванням розподілу кутів атаки та товщини лопатей забезпечує кращий результат, ніж зміни лише у площині проєкції [17].

Практичні приклади підтверджують можливість підвищення ефективності на 0,5–3,5 % у випадку насосів-турбін та насосів, що працюють у реверсивному режимі [18]. Окремі проєкти досягають понад 90 % гідравлічного ККД робочого колеса, проте, в якості мети, результат у 95 % належить до найвищого рівня і потребує ретельної оптимізації та верифікації [19; 20]. У літературі наголошується на необхідності підтвердження таких результатів шляхом багатоточкових чисельних розрахунків (для різних режимів роботи) та експериментальних випробувань [21]. Таким чином, підвищення ефективності проєктування відцентрових насосів, насосів-турбін для ГАЕС є актуальною проблемою, вирішення якої потребує ретельного аналізу та комбінації усіх доступних сучасних методів із застосуванням обчислювальної гідродинаміки та методів оптимізації.

Мета. Метою роботи є проєктування та оптимізація робочого колеса відцентрового насоса засобами обчислювальної гідродинаміки.

Результати досліджень. Методика дослідження складалася з наступних етапів: на першому етапі проєктувався відцентровий насос за допомогою програмного забезпечення Ansys Vista CPD [22] з

подальшою генерацією лопатей у Ansys BladeGen, створенням гексагональної сітки у TurboGrid та розрахунком течії у насосі за допомогою Ansys CFX. На другому етапі виконано модифікацію проточної частини у міжлопатевому просторі з метою покращення показників ефективності роботи робочого колеса шляхом удосконалення розподілу меридіональної швидкості. На третьому етапі дослідження виконано модифікацію лопаті робочого колеса та проведено порівняння картин течії в усіх варіантах спроектованих коліс та порівняння інтегральних показників роботи. Всі етапи дослідження проведено на основі чисельного моделювання.

Математична модель [23] включала в себе рівняння Рейнольдса, рівняння нерозривності та рівняння SST-моделі турбулентності [24]. На рис. 1 наведено розрахункову сіткову модель спроектованого робочого колеса та вхідного каналу.

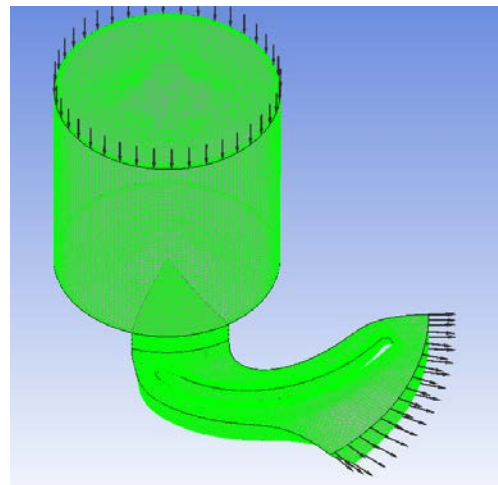


Рис. 1. Розрахункова модель робочого колеса відцентрового насоса з однією лопаттю для використання секторного підходу

Розрахунок здійснено у стаціонарній постановці з наступними граничними умовами: у вхідному перетині задавався загальний тиск величиною 0 Па, у вихідному перетині задавалася масова витрата 39000 кг/с. На твердих стінках – умова прилипання рідини з нульовою швидкістю. На інтерфейсі між сектором робочого колеса ($51,4^\circ$) та вхідною частиною встановлено умову замороженого ротора (Frozen Rotor [25; 26]). Для закінчення розрахунку необхідне було виконання двох умов: зменшення нев'язань рівнянь Рейнольдса та рівняння нерозривності до значень 10^{-5} та забезпечення сталості середнього тиску у вихідному перетині робочого колеса [27; 28].

На рис. 2 наведено результати розрахунку течії у робочому колесі, що пропонується для заданих умов проєктування (частота обертання 500 об/хв.; подача 39 м³/с; густину рідини 1000 кг/м³; напір 528 м; 7 лопатей). Оцінка ефективності робочого колеса окремо без дифузора на виході показала ККД, який дорівнював 91,5 %.

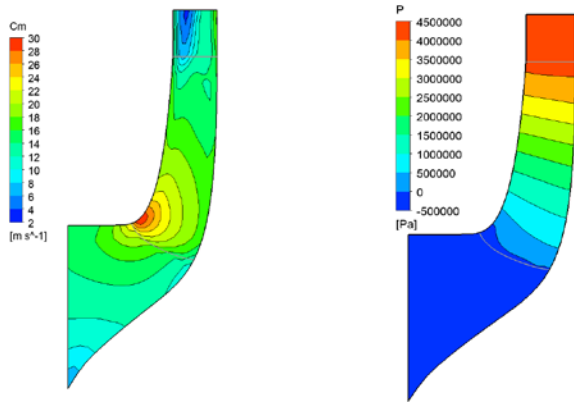


Рис. 2. Результати розрахунку спроектованого насоса в меридіональній площині

На рис. 2 можна спостерігати, що проточна частина різко «стискається» між тисковою стороною однієї лопаті й відсмоктувальною стороною сусідньої. За законом збереження витрати, якщо площа зменшується, то зростає меридіональна швидкість. Відсмоктувальна сторона має більший криволінійний вигин, і потік «прилипає» до неї, створюючи прискорення біля цієї стінки. Цей ефект для лопатевих каналів пояснюється тим, що максимальна швидкість концентрується ближче до відсмоктувальної сторони. Отже, збільшення меридіональної швидкості до 30 м/с є результатом прискорення потоку у звуженому каналі біля відсмоктувальної сторони лопаті. Вона критична тим, що веде до локальних втрат (через зсувні шари й вихороутворення), можливого відриву потоку далі по траєкторії та підвищення ризику кавітації.

Можливим покращенням течії у спроектованому насосі є збільшення площі місцевого перерізу шляхом локального збільшення ширини каналу. Крім того, можна зробити менш різкий вигин стінки на вході в цю ділянку (зменшити радіус кривизни), тобто згладити конфігурацію, щоб потік не «втискався» у відсмоктувальну сторону.

Іншою проблемою, крім збільшення меридіональної швидкості, є різкий перепад тиску на задній кромці лопаті (рис. 3), пов'язаний з кількома причинами: збігання потоків з тискової та відсмоктувальної сторін; вихороутворення і відрив потоку; вплив граничних умов CFD-моделювання; особливості профілю лопаті.

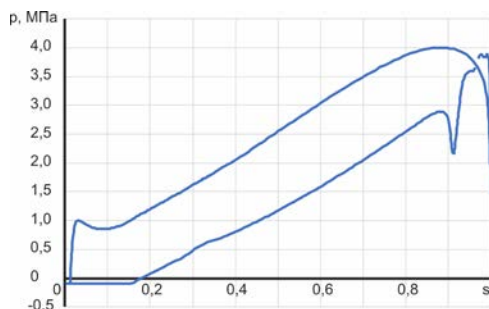


Рис. 3. Розподіл статичного тиску вздовж лопаті на 50 % висоти

Різкий перепад тиску, що спостерігається на рисунку, пояснюється тим, що біля задньої кромки

обидва потоки повинні «зустрітися». Через різний рівень тиску та швидкості на цих поверхнях виникає стрибкоподібне вирівнювання тиску. На виході з каналу між лопатями виникають інтенсивні зсувні шари та турбулентні вихори. Це спричиняє нерівномірність і локальні зниження тиску, які на графіку виглядають як «провали». Крім того, вплив граничних умов недалеко позаду геометрично гострої задньої кромки призводить до різкого стрибка. В реальному потоці він згладжується завдяки в'язкості та турбулентності. Гостра кромка створює локальну сильну дискретизацію потоку та розриви, що можна зменшити заокругленням, що пом'якшує перепад і зменшує відрив.

На рис. 4 наведено прогнозовану характеристику робочого колеса. Спостерігається широка зона оптимальних значень ККД, які перевищують 91 %.

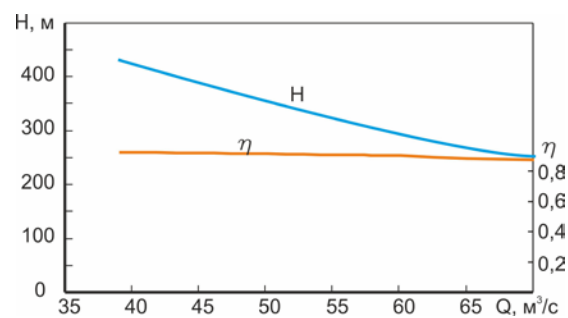


Рис. 4. Прогнозна напорна характеристика та залежність ККД

На рис. 5 наведено зміни, що виконано для покращення ККД у два етапи: на першому етапі змінено проточну частину у меридіональній площині шляхом збільшення площі прохідного перетину, а на другому етапі виконано зміни у профілі лопаті для зменшення перепаду тиску на задній кромці.

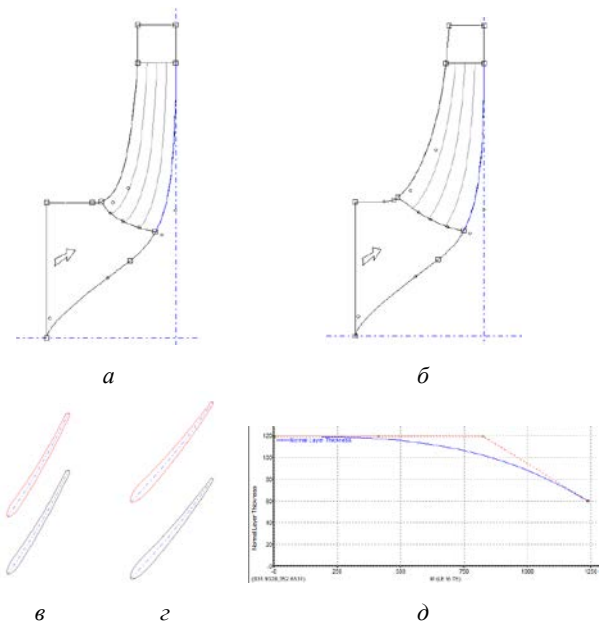


Рис. 5. Зміни геометрії проточної частини для покращення ефективності робочого колеса: а – базова; б – модифікація 1; в – базовий профіль лопаті; г – модифікація 2; д – зміна товщини лопаті

Таким чином, проведено дослідження трьох конструкцій проточної частини і порівняно між собою. Перша конструкція є базовою спроектованою за допомогою Ansys Vista CPD, друга – покращено проточну частину в меридіональній площині, відповідно до рис. 5, б. Третя модифікація – покращено профіль лопаті шляхом зміни товщини її зменшенням біля задньої кромки. В цьому випадку проточна частина в меридіональній площині залишалася тією самою, що й для модифікації 2. Крім того, в третій модифікації, на основі оцінки профіля швидкості біля вхідної кромки, змінено кут входу потоку, що ілюструється рис. 5, г.

На рис. 6 наведено порівняння профілів меридіональної швидкості для трьох модифікацій робочого колеса.

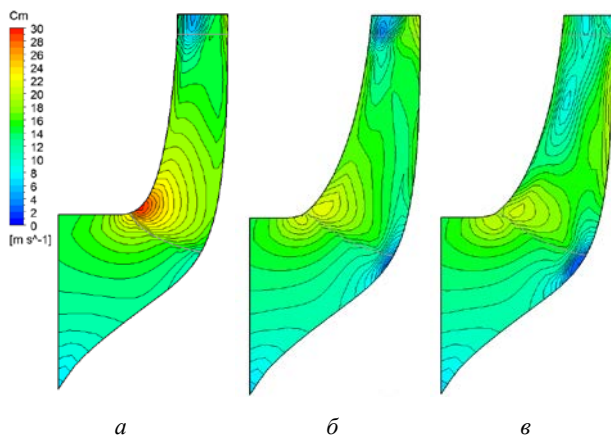


Рис. 6. Розподіл меридіональної швидкості у проточній частині робочого колеса:

а – базова; б – модифікація 1; в – модифікація 2

Для модифікації 1 (рис. 6, б) спостерігається усунення червоної зони та більш рівномірний розподіл швидкості, однак залишаються локальні ділянки підвищеної швидкості біля правої стінки каналу, що свідчить про неповну оптимізацію потоку порівняно з базовим варіантом. Натомість модифікація 2 демонструє найбільш рівномірний розподіл меридіональної швидкості без різких локальних прискорень чи відривів, завдяки чому потік плавно проходить кривину з мінімальними гідравлічними втратами. Це вказує на ефективну оптимізацію геометрії каналу та пояснює можливе підвищення ККД робочого колеса, що робить модифікацію 2 найбільш доцільним рішенням серед розглянутих варіантів.

На рис. 7 наведено розподіл ліній струму в міжлопатевому просторі для трьох варіантів геометрії. У базовому випадку (рис. 7, а) видно значні викривлення траєкторій потоку та наявність зон із підвищеною швидкістю, що свідчить про нерівномірність розподілу й підвищені втрати. Модифікація 1 (рис. 7, б) покращує ситуацію – лінії струму стають більш впорядкованими, однак у вихідній частині каналу все ще помітні локальні прискорення та відхилення потоку. Найбільш сприятлива картина спостерігається у модифікації 2

(рис. 7, в): лінії струму проходять рівномірно вздовж каналу, без різких змін швидкості та вихрових структур, що забезпечує стабільний режим течії та мінімізацію гідравлічних втрат. Таким чином, саме модифікація 2 є найбільш ефективною з точки зору підвищення ККД відцентрового насоса.

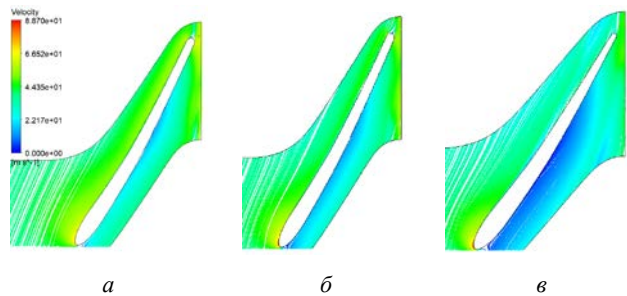


Рис. 7. Розподіл ліній струму у міжлопатевому просторі:

а – базова; б – модифікація 1; в – модифікація 2

На рис. 8 представлено розподіл тиску вздовж лопаті для трьох варіантів геометрії: базової, модифікації 1 та модифікації 2. Базова конфігурація (пунктирна лінія) характеризується нижчими значеннями тиску та помітними коливаннями біля вихідної кромки, що свідчить про суттєві гідравлічні втрати. Модифікація 1 (помаранчева лінія) демонструє більш високий тиск уздовж лопаті, проте поблизу вихідної кромки залишаються різкі перепади, які можуть знижувати ефективність. Найбільш стабільний характер розподілу показує модифікація 2 (чорна лінія): тиск зростає більш плавно, а коливання у вихідній зоні значно зменшені, що свідчить про покращену аеродинаміку лопаті та мінімізацію втрат. Отже, з позиції підвищення ККД робочого колеса відцентрового насоса найефективнішою є саме модифікація 2.

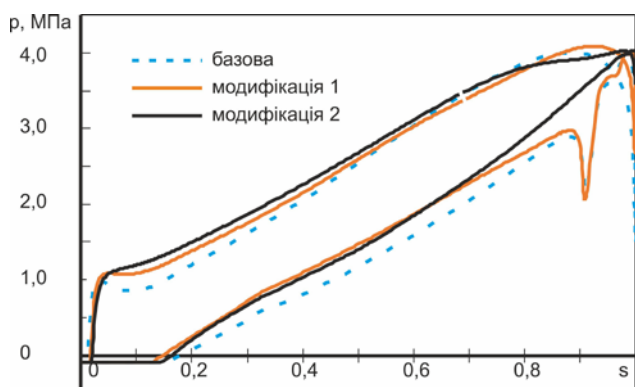


Рис. 8. Розподіл статичного тиску вздовж лопаті на 50 % висоти для трьох конструкцій робочого колеса

В табл. 1 наведено основні інтегральні характеристики роботи робочого колеса трьох конструкцій. Базова геометрія забезпечує тиск 4,23 МПа, напір 588 м та ККД 0,927. Найкращі результати демонструє модифікація 2: тиск підвищується до 4,35 МПа, напір до 621 м, а ККД зростає до 0,952. Це свідчить про суттєве зменшення гідравлічних втрат і підвищення енергетичної ефективності. Отже, серед розглянутих варіантів саме

модифікація 2 є найбільш доцільною для використання у спроектованому насосі з максимальною ефективністю.

Таблиця 1 – Порівняння інтегральних показників роботи трьох робочих коліс в розрахунковій точці $Q = 39 \text{ м}^3/\text{с}$

Робоче колесо	Тиск на виході, МПа	Різниця напорів, м	ККД
Базове	4,23	588	0,927
Модифікація 1	4,27	603	0,929
Модифікація 2	4,35	621	0,952

Результати дослідження підтверджують, що навіть відносно невеликі зміни геометрії проточної частини можуть суттєво вплинути на ефективність роботи відцентрового насоса. Аналіз базової конструкції показав типові проблеми: локальні прискорення біля відсмоктувальної сторони та перепади тиску на задній кромці, які зумовлюють зростання гідравлічних втрат. Модифікація 1 дозволила усунути найбільш критичні зони високої швидкості, однак не забезпечила повної рівномірності потоку. Натомість модифікація 2 продемонструвала комплексний ефект: згладження кривизни каналу та корекція профілю лопаті дали змогу отримати стабільний розподіл швидкості та тиску. Це узгоджується з тенденціями сучасних досліджень, де комбінується параметрична оптимізація та CFD-аналіз для досягнення максимальної ефективності. Варто підкреслити, що підвищення ККД на 2,5 % у випадку гідроагрегатів великої потужності є вагомим результатом, який безпосередньо впливає на економіку експлуатації станції. Обмеженням дослідження є використання стаціонарної постановки та моделі Frozen Rotor, що може не враховувати всі нестационарні ефекти. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення результатів за допомогою нестационарних моделей та врахування кавітаційних явищ, що дозволить розширити область застосування отриманих висновків.

Висновки. В роботі на основі чисельного моделювання в Ansys CFX спроектовано та оптимізовано робоче колесо відцентрового насоса, як проміжна стадія проектування оборотної гідромашини у насосному режимі. Виконано порівняння базової геометрії робочого колеса та двох модифікацій, спрямованих на покращення розподілу швидкості й тиску в проточній частині.

1. Виявлено, що базова модель характеризується локальними зонами високої швидкості (до 30 м/с) і різким перепадом тиску на задній кромці, що знижує ККД. Модифікація 1 покращила розподіл меридіональної швидкості, проте зберегла певну нерівномірність потоку.

2. Найбільш ефективною стала модифікація 2, яка забезпечила підвищення тиску на виході до 4,35 МПа, напору до 621 м і зростання ККД до 0,952.

Список літератури

- Xiaolong Y., Huanmao W., Ming L., Chao W. The Pump-turbine Hydraulic Performance Research, Model Test and Operation in

- Yangjiang Pumped Storage Power Station. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2752, no. 1. P. 012074. doi: 10.1088/1742-6596/2752/1/012074
- Резва К. С., Дранковський В. Е., Шевцов В. М., Оспіщева Л. О. Застосування методів математичного моделювання при чисельному дослідженні гідродинамічних характеристик високонапірної оборотної гідромашини. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2020. No. 1. P. 46–52.
- Рябенко О. А., Клюха О. О., Тимошук В. С. Роль ГАЕС в роботі енергосистем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Київ, 2014. № 2. С. 167–170.
- Yang W., Xiao R. Multiobjective optimization design of a pump-turbine impeller based on an inverse design using a combination optimization strategy. *Journal of Fluids Engineering*. 2014. Vol. 136, issue 1. P. 014501. doi: 10.1115/1.4025454
- Shang L., Zhu J., Huang X., Gao S., Wang Z., Liu J. Fluid-Structure Interactions in Pump-Turbines: A Comprehensive Review. *Processes*. 2025. Vol. 13, issue 7. P. 2321. doi: 10.3390/pr13072321
- Kang W., Zhou L., Wang Z. Analysis of flow characteristics and cavitation in the vanes of a reversible pump-turbine in pump mode. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 68. P. 107690. doi: 10.1016/j.est.2023.107690
- 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
- Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyy 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
- Zhang X., Yang Q., Chen Q., Chen R. A data-driven identification of runner flow patterns in a model pump-turbine by machine learning methods. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 103. Id. 114245. doi: 10.1016/j.est.2024.114245
- Bostan V., Petco A. Design and optimization of the centrifugal pump impeller for wastewater. *Innovative Manufacturing Engineering and Energy*. 2024. Vol. 46. P. 362–369. doi: 10.21741/9781644903377-47
- Роговий А. С., Дранковський В. Е., Тиньянов О. Д., Азаров А. С. Проектування оборотної гідромашини 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
- Ji Y., Song H., Xue Z., Li Z., Tong M., Li H. A Review of the Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery. *Processes*. 2023. Vol. 11, issue 6. P. 1815. doi: 10.3390/pr11061815
- Zhao J., Pei J., Yuan J., Wang W. Energy-saving oriented optimization design of the impeller and volute of a multi-stage double-suction centrifugal pump using artificial neural network. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 16, issue 1. P. 1974–2001. doi: 10.1080/19942060.2022.2127913
- 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
- Showkat S., Harmain G. A., Masoodi J. H. Cavitation control in Francis turbines by design optimization across variable operating conditions. *Next Energy*. 2025. Vol. 9. P. 100391. doi: 10.1016/j.nxener.2025.100391
- Wang C., Zhang Y., Liu Z., Yuan Z. Multi-objective optimization of a two-stage liquefied natural gas cryogenic submerged pump-turbine

- in pump mode to reduce flow loss and cavitation. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 52. P. 105064. doi: 10.1016/j.est.2022.105064
17. Zhao J., Pei J., Yuan J., Wang W. Energy-saving oriented optimization design of the impeller and volute of a multi-stage double-suction centrifugal pump using artificial neural network. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 16, issue 1. P. 1974–2001. doi: 10.1080/19942060.2022.2127913
 18. Sen-Chun M., Zhi-Xiao S., Xiao-Hui W., Feng-Xia S., Guang-Tai S. Impeller meridional plane optimization of pump as turbine. *Science progress*. 2020. Vol. 103, issue 1. P. 36850419876542. doi: 10.1177/0036850419876542
 19. 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
 20. 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
 21. Li Z., Lu X., Han G., Huang E., Yang C., Zhu J. Numerical and experimental investigation of flow mechanism and application of tandem-impeller for centrifugal compressor. *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 100. P. 105819. doi: 10.1016/j.ast.2020.105819
 22. 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
 23. ANSYS, C. R24.1 Help manual. ANSYS Inc. 2024.
 24. 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.
 25. 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
 26. Santhi R., Vasanthakumar P. Computational fluid dynamics for turbomachinery technologies with a focus on high-speed rotor blades. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 68. P. 2310–2317. doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.555
 27. Calzolari G., Liu W. Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*. 2021. Vol. 206. P. 108315. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108315
 28. Chowdhury I. A. State-of-the-Art CFD Simulation: A Review of Techniques, Validation Methods, and Application Scenarios. *Journal of Recent Trends in Mechanics*. 2024. Vol. 9, issue 2. P. 45–53. doi: 10.46610/JoRTM.2024.v09i02.005
- References (transliterated)**
1. Xiaolong Y., Huanmao W., Ming L., Chao W. The Pump-turbine Hydraulic Performance Research, Model Test and Operation in Yangjiang Pumped Storage Power Station. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, vol. 2752, no. 1, p. 012074. doi: 10.1088/1742-6596/2752/1/012074
 2. Ryzva 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.
 3. Ryabenko O. A., Klyukha O. O., Tymoshchuk V. S. Rol' HAES v roboti enerhosystem [The role of PSP in the operation of power systems]. *Vymiryuval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. Kyiv. 2014, no. 2, pp. 167–170.
 4. Yang W., Xiao R. Multiobjective optimization design of a pump-turbine impeller based on an inverse design using a combination optimization strategy. *Journal of Fluids Engineering*. 2014, vol. 136, issue 1, p. 014501. doi: 10.1115/1.4025454
 5. Shang L., Zhu J., Huang X., Gao S., Wang Z., Liu J. Fluid-Structure Interactions in Pump-Turbines: A Comprehensive Review. *Processes*. 2025, vol. 13, issue 7, p. 2321. doi: 10.3390/pr13072321
 6. Kang W., Zhou L., Wang Z. Analysis of flow characteristics and cavitation in the vanes of a reversible pump-turbine in pump mode. *Journal of Energy Storage*. 2023, vol. 68, p. 107690. doi: 10.1016/j.est.2023.107690
 7. 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
 8. Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyy 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. Zhang X., Yang Q., Chen Q., Chen R. A data-driven identification of runner flow patterns in a model pump-turbine by machine learning methods. *Journal of Energy Storage*. 2024, vol. 103, id. 114245. doi: 10.1016/j.est.2024.114245
 10. Bostan V., Petco A. Design and optimization of the centrifugal pump impeller for wastewater. *Innovative Manufacturing Engineering and Energy*. 2024, vol. 46, pp. 362–369. doi: 10.21741/9781644903377-47
 11. Rogovyi A. S., Drankovskiy V. E., Tynyanov 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
 12. Ji Y., Song H., Xue Z., Li Z., Tong M., Li H. A Review of the Efficiency Improvement of Hydraulic Turbines in Energy Recovery. *Processes*. 2023, vol. 11, issue 6, p. 1815. doi: 10.3390/pr11061815
 13. Zhao J., Pei J., Yuan J., Wang W. Energy-saving oriented optimization design of the impeller and volute of a multi-stage double-suction centrifugal pump using artificial neural network. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022, vol. 16, issue 1, pp. 1974–2001. doi: 10.1080/19942060.2022.2127913
 14. 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
 15. Showkat S., Harmain G. A., Masoodi J. H. Cavitation control in Francis turbines by design optimization across variable operating conditions. *Next Energy*. 2025, vol. 9, p. 100391. doi: 10.1016/j.nxener.2025.100391
 16. Wang C., Zhang Y., Liu Z., Yuan Z. Multi-objective optimization of a two-stage liquefied natural gas cryogenic submerged pump-turbine in pump mode to reduce flow loss and cavitation. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 52, p. 105064. doi: 10.1016/j.est.2022.105064
 17. Zhao J., Pei J., Yuan J., Wang W. Energy-saving oriented optimization design of the impeller and volute of a multi-stage double-suction centrifugal pump using artificial neural network. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022, vol. 16, issue 1, pp. 1974–2001. doi: 10.1080/19942060.2022.2127913
 18. Sen-Chun M., Zhi-Xiao S., Xiao-Hui W., Feng-Xia S., Guang-Tai S. Impeller meridional plane optimization of pump as turbine. *Science progress*. 2020, vol. 103, issue 1, p. 36850419876542. doi: 10.1177/0036850419876542

19. Rogovyi A. S., Azarov A. S., Demchuk R. M. Udoskonalennya kharakterystyk robochoho kola vysokonapimoho vidtsentrovoho kompresora proektuvannyam 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
20. 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, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
21. Li Z., Lu X., Han G., Huang E., Yang C., Zhu J. Numerical and experimental investigation of flow mechanism and application of tandem-impeller for centrifugal compressor. *Aerospace Science and Technology*. 2020, vol. 100, p. 105819. doi: 10.1016/j.ast.2020.105819
22. 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
23. ANSYS, C. R24.1 Help manual. ANSYS Inc. 2024.
24. 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.
25. 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
26. Santhi R., Vasanthakumar P. Computational fluid dynamics for turbomachinery technologies with a focus on high-speed rotor blades. *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 68, pp. 2310–2317. doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.555
27. Calzolari G., Liu W. Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*. 2021, vol. 206, p. 108315. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108315
28. Chowdhury I. A. State-of-the-Art CFD Simulation: A Review of Techniques, Validation Methods, and Application Scenarios. *Journal of Recent Trends in Mechanics*. 2024, vol. 9, issue 2, pp. 45–53. doi: 10.46610/JoRTM.2024.v09i02.005

Надійшла (received) 18.09.2025

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

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

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

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

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