

I. I. ТИНЬЯНОВА, О. Д. ТИНЬЯНОВ, Д. А. САВЕНКОВ, М. К. КОЦЮРУБА, І. С. НЕВИННИЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОГО КОЛІСА ОБОРотної ГІДРОМАШИНИ

Розглянуто актуальну проблему розвитку та відновлення гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС) в Україні, зокрема в умовах війни, що суттєво пошкодила енергетичну інфраструктуру та створила дефіцит потужностей. ГАЕС відіграють важливу роль у стабілізації енергосистеми, оскільки вони накопичують енергію під час низького навантаження і оперативно використовують її в пікові періоди або при аваріях. Водночас вони сприяють підвищенню енергетичної автономії країни та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Акцентується, що при модифікації робочого колеса (РК) таких гідромашин (ГМ) виникає потреба у зміні геометрії окремих решіток. Кількісна оцінка внесених змін має базуватися на кінематичному й енергетичному аналізі кожної з решіток, що формують РК. Аналіз енергетичних і кінематичних характеристик просторової решітки РК дозволяє визначити внесок кожної окремої решітки (периферійної чи втулкової) у забезпечення необхідних експлуатаційних показників. Застосування безрозмірних параметрів для визначення гідродинамічних характеристик елементарних решіток РК дає змогу виявити закономірності робочого процесу та оцінити вплив геометрії РК і режимних параметрів ГМ на енергетичні характеристики. Встановлено, що оптимальний режим досягається за приблизно однаковою величиною позитивної циркуляції для всіх решіток; що складають просторову решітку РК. Виконане чисельне моделювання просторової течії в'язкої рідини в РК оборотних ГМ. Результати досліджень дозволили проаналізувати розподіл швидкості у РК. Підтверджено сталий характер течії вздовж вихідної кромки РК, що свідчить про узгодженість елементарних решіток на оптимальному режимі роботи, який забезпечує високі енергетичні показники ГМ. Порівняльний аналіз отриманих результатів за різними моделями з результатами фізичного експерименту показав задовільну збіжність, що свідчить про доцільність застосування обраних методів для дослідження оборотних гідромашин.

Ключові слова: оборотна гідралічна машина, проточна частина, робоче колесо, просторова решітка, безрозмірні параметри, кінематичні характеристики, енергетичні параметри, розподіл швидкості.

I. TYNIANOVA, O. TYNIANOV, D. SAVENKOV, M. KOTSIURUBA, I. NEVYNNYI

RESEARCH OF THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE RUNNER OF THE HIGH-EFFICIENCY OF PUMP-TURBINE

The current problem of development and restoration of pumped storage power plants in Ukraine is considered, in particular in the war conditions, which significantly damaged the energy infrastructure and created a capacity shortage. Pumped storage power plants play an important role in the power system stabilization, as they accumulate energy during low load and promptly use it during peak periods or in case of accidents. At the same time, they contribute to increasing the energy autonomy of the country and the integration of renewable energy sources. It is noted that when modifying the runner of such hydraulic machines, there is a need to change the geometry of individual lattice. The quantitative assessment of the changes made should be based on the kinematic and energy analysis of each runner lattices. Analysis of the energy and kinematic characteristics of the spatial runner lattice allows to determine the contribution of each separate lattice (periphery or hub) to ensuring the necessary operational characteristics. The use of dimensionless parameters to determine the hydrodynamic characteristics of elementary runner lattices allows to identify the regularities of the working process and to assess the influence of the runner geometry and the regime parameters of the hydraulic machines on the energy characteristics. It was found that the optimal mode is achieved at approximately the same value of positive circulation for all lattices; that build the spatial runner lattice. Numerical modeling of the spatial flow of viscous fluid in the runner of reversible hydraulic machines was performed in this work. The results of the research allowed to analyze the velocity distribution in the runner. The steady nature of the flow along the output edge of the runner was confirmed. This result indicates the consistency of the elementary lattices in the optimal operating mode, which provides high energy indicators of the hydraulic machine. A comparative analysis of the results obtained by different models with the results of the physical experiment showed satisfactory convergence. Obtained results indicate the expediency of using the selected methods for studying reversible hydraulic machines.

Keywords: reversible hydraulic machine, water passage, runner, spatial lattice, dimensionless parameters, kinematic characteristics, energy parameters, velocity distribution.

Вступ. Відновлення гідроенергетичних об'єктів після війни є одним із ключових завдань для енергетичної системи України. Гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС) мають критичне значення для стабільної роботи енергомережі, оскільки забезпечують баланс між виробництвом і споживанням електроенергії, особливо в умовах зростаючої частки відновлюваних джерел енергії (сонячних і вітрових), що характеризуються нерівномірною генерацією. Окрім технічної стабільності, ці станції сприяють підвищенню енергонезалежності країни, адже їх відновлення дозволить зменшити залежність від імпорту електроенергії та посилити стійкість енергосистеми до зовнішніх загроз. Відновлення ГАЕС забезпечує також економічну вигоду через ефективне використання енергоресурсів і сприяє досягненню екологічних цілей, оскільки ці станції не продукують

шкідливих викидів. Залучення міжнародних партнерів і впровадження інноваційних технологій є ключовими етапами відновлення цієї критичної інфраструктури [1–5].

Водночас важливим завданням є підвищення ефективності та надійності оборотних гідромашин, які є основними компонентами ГАЕС. При модифікації робочого колеса (РК) таких гідромашин виникає потреба в зміні геометрії окремих решіток. Кількісна оцінка внесених змін має базуватися на кінематичному й енергетичному аналізі кожної з решіток, що формують РК. Аналіз енергетичних і кінематичних характеристик просторової решітки РК дозволяє визначити внесок кожної окремої решітки (периферійної чи втулкової) у забезпечення необхідних експлуатаційних показників.

Таким чином, аналіз силової взаємодії потоку з окремими решітками є вкрай актуальним. Низка

досліджень демонструє, як зміни в конструкції окремих решіток впливають на енергетичні та кавітаційні показники оборотних гідромашин, а також поворотно-лопатевої і середньошвидкісних радіально-осьових гідротурбін [6–17].

Метою даної роботи є розробка методики визначення та аналізу гідродинамічних характеристик елементарних решіток РК оборотної гідромашини, що дозволяє оцінювати ступінь узгодженості окремих решіток, які входять до складу просторової лопаті РК.

Основна частина. Аналіз досліджень робочих процесів оборотних гідромашин показує, що розробці проточних частин (ПЧ) радіально-осьових високонапірних машин приділяється недостатньо уваги. Для ГАЕС ключовим є насосний режим, оскільки оборотна гідромашини повинна забезпечувати необхідний напір та відповідні кавітаційні характеристики. При цьому в турбінному режимі потрібно досягати розрахункової потужності з максимальним ККД.

Невідповідність оптимального режиму розрахунковим параметрам вимагає глибокого аналізу проточної частини в турбінному режимі для уточнення потужності, підвищення ККД та зменшення гідродинамічних нестабільностей. Сучасний підхід до дослідження ПЧ передбачає багатоваріантний аналіз впливу геометричних і режимних параметрів на енергетичні характеристики, що базується на використанні математичних моделей різних рівнів деталізації.

Створення системи взаємопов'язаних моделей на різних ієрархічних рівнях дозволяє ефективно проводити моделювання на всіх етапах проектування. Блочно-ієрархічний підхід дає змогу [18; 19]:

- автономно досліджувати характеристики окремих елементів ПЧ;
- вдосконалювати модель окремих елементів, не змінюючи загальну структуру;
- адаптувати рівень деталізації відповідно до цілей проектування.

Таким чином, цей підхід забезпечує гнучкість і ефективність у проектуванні та аналізі енергетичних характеристик оборотних гідромашин. У межах такого підходу зміна структури потоку зі зміною режиму враховується за допомогою набору взаємопов'язаних моделей різного рівня деталізації. Вибір оптимальної моделі залежить як від етапу дослідження ПЧ, так і від характеру поставленого завдання.

Практика розрахункових досліджень демонструє доцільність включення до кінематичного опису таких моделей:

- спрощеної моделі осередненого осесиметричного потоку, яка приблизно враховує зміщення поверхонь струму в порожнині РК;
- моделі потоку в решітках на поверхнях струму без врахування їхнього зміщення зі зміною режиму;
- опису потоку на основі безрозмірних усереднених параметрів.

У комплексі ці моделі забезпечують кінематичний опис в осьосиметричній зоні ПЧ, що слугує основою для створення математичних моделей

(ММ) робочого процесу загалом. Використання цього підходу дозволяє визначати параметри потоку без необхідності проведення обчислень обтікання. В роботі наводиться методика для визначення та аналізу гідродинамічних характеристик елементарних решіток РК оборотної гідромашини, яка забезпечує оцінку рівня узгодженості окремих решіток, що входять до складу просторової лопаті РК.

Кінематичні характеристики елементарних решіток. Кінематичні характеристики елементарних решіток визначаються залежністю вихідних параметрів потоку від вхідних параметрів та режимних умов. При цьому геометрія кожної з елементарних решіток, що входять до складу РК, залишається незмінною. Меридіональна швидкість на вхідній та вихідній кромках може бути виражена наступним чином: $C_{1m} = B_1(l_1)Q$ і $C_{2m} = B_2(l_2)Q$ (рис. 1). Параметри $B_1(l_1)$, $B_2(l_2)$ залежать від геометрії решітки на даній поверхні струму і не залежать від режиму; криволінійні координати l_1 і l_2 – відраховуються від втулки відповідно вздовж вхідної та вихідної кромки лопаті РК.

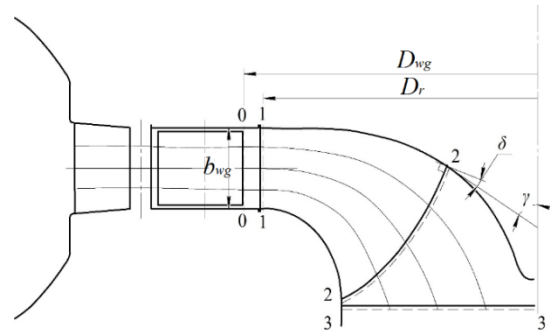


Рис. 1. Розрахункові перерізи проточної частини оборотної гідромашини при турбінному режимі

В рамках наближеної моделі течії коефіцієнт меридіональної швидкості $C_m^* = \frac{C_m D^2}{Q} = B D^2 = B'$ в кожній точці вхідної і вихідної кромки залишається постійним (не залежить від режимних параметрів ω і Q). Величини коефіцієнтів меридіональної швидкості виходять із рівняння витрати.

$$C_{1m}^* = B_1' = \frac{1}{n2\pi r_1' \Delta_1'}; \quad C_{2m}^* = B_2' = \frac{1}{n2\pi r_2' \Delta_2'}, \quad (1)$$

де Δ_1' , Δ_2' – товщини шару потоку елементарних решіток на вхідній і вихідній крайках, віднесені до діаметру РК $D = 1$ м, $r_1' = \frac{r_1}{D}$, $r_2' = \frac{r_2}{D}$. Розподіл коефіцієнта меридіональної швидкості B_2' вздовж вихідної кромки визначається відповідно до прийнятого меридіонального потоку і зберігається зі зміною режиму.

Кути потоку в абсолютному та відносному русі на вході в елементарну решітку знаходяться з рівнянь кінематичного зв'язку [5; 6]:

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{1}{2\pi B_1' r_1'} \frac{\Gamma_0 D}{Q}. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \beta_1 &= \frac{r_1}{B_1} k_Q - \operatorname{ctg} \alpha_1; \\ \operatorname{ctg} \beta_1 &= \frac{r_1}{B_1} k_Q - \frac{1}{2\pi B_1 r_1} \frac{\Gamma_0 D}{Q}; \\ \operatorname{ctg} \beta_1 &= \frac{r_1}{B_1} k_Q - \frac{m}{2\pi B_1 r_1} \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}. \end{aligned} \quad (3)$$

У формулах (2) і (3):

$$k_Q = \frac{\omega D^3}{Q} = \frac{\pi n_1}{30 Q_1} - \text{узагальнений режимний}$$

параметр;

$$\frac{\Gamma_0 D}{Q} - \text{безрозмірний кінематичний комплекс за}$$

НА;

$$\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} - \text{середній кінематичний комплекс;}$$

$$m = \left(\frac{\Gamma_0 D}{Q} / \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} \right) - \text{коефіцієнт, що враховує}$$

нерівномірність вхідної циркуляції по висоті лопаті;

α_1 – кут потоку в абсолютному русі у вхідному перерізі РК;

β_1 – кут потоку на вході в РК у відносному русі.

Циркуляція та кути потоку в абсолютному та відносному русі на виході з елементарної решітки:

$$\Gamma_2 = k\Gamma_1 - (1-k)q \operatorname{ctg} \beta_{02} + (1-k)2\pi r_a^2 \omega, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \alpha_2 &= k \frac{r_1^2 B_1}{r_2^2 B_2} \operatorname{ctg} \beta_1 - (1-k) \operatorname{ctg} \beta_{02} + \\ &+ (1-k) \frac{r_a^2}{r_2^2} \frac{r_2}{B_2} \frac{\omega D^3}{Q}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \beta_2 &= k \frac{r_1}{r_2} \frac{B_1}{B_2} \operatorname{ctg} \beta_1 + (1-k) \operatorname{ctg} \beta_{02} - \\ &- (1-k) \left[\frac{r_a^2}{r_2^2} - \frac{(1-k) \frac{r_1^2}{r_2^2}}{1-k} \right] \frac{r_2}{B_2} \frac{\omega D^3}{Q}. \end{aligned} \quad (6)$$

У формулах (4)–(6) k , r_a – гідродинамічні параметри елементарних решіток:

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta_2} = 2\pi r_2 C_{2m}, \quad (7)$$

q – витрата, віднесена до товщини шару потоку в околиці вихідної кромки.

Для густих решіток РК оборотної гідромашини коефіцієнт прозорості k малий, тому можна вважати $k=0$. Активний радіус решітки r_a знаходиться за допомогою спрощених моделей течії в каналах робочого колеса [18; 19]:

$$r_a = r_2 \sqrt{1 + \frac{\pi}{z} \sin \beta_{21} \sin \gamma_2}.$$

Для визначення кута безударного напрямку потоку за решітками β_{02} вводиться поправка, що враховує відмінність його від вихідного геометричного кута $\beta_{02} = \beta_{21} + \Delta \beta_{02}$.

Формули (1), (5), (6) вирішують завдання розрахунку меридіональних швидкостей і кутів потоку (в абсолютному та відносному русі) в околиці вихідної кромки. Кільцева складова швидкості знаходиться з вихідного трикутника швидкостей $C_{2u} = C_{2m} \operatorname{ctg} \alpha_2$.

Для кожної з елементарних решіток РК справедливе рівняння зв'язку циркуляцій (4), наведемо рівняння в безрозмірній формі:

$$\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = k m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} - (1-k)\mu + (1-k) \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q, \quad (8)$$

де $\mu = \frac{\operatorname{ctg} \beta_{02}}{\Delta_2} = 2\pi r_2 B_2 \operatorname{ctg} \beta_{02}$ – гідродинамічний

параметр просторової решітки, що характеризує напрямок потоку в відносному русі, при якому гідравлічний момент на решітці дорівнює нулю;

$\lambda = \frac{r_a^2}{R^2}$ – безрозмірний активний радіус решітки;

$\Delta_2 = \frac{1}{2\pi r_2 B_2}$ – товщина шару потоку

елементарної решітки у вихідному перерізі РК.

Наведені рівняння описують кінематику потоку в абсолютному та відносному русі на вході та виході з решіток РК і можуть бути використані для аналізу потоку ПЧ гідромашин.

Безрозмірні теоретичні характеристики елементарних решіток РК. Наведемо рівняння безрозмірних напірної, моментної і потужностної характеристик, відповідно, для елементарних решіток РК в безрозмірному вигляді, де в якості змінних з незалежною розмірністю прийняті: ρ , D і Q [18–20]:

$$k_{HT} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right), \quad (9)$$

$$k_{MT} = \frac{M_{\Gamma} D}{\rho Q_{\kappa}^2} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right) k_Q, \quad (10)$$

$$k_{MN} = \frac{N_{\Gamma} D^4}{\rho Q_{\kappa}^3} = k_{HN} = \frac{1-k}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q \right). \quad (11)$$

Для дослідження робочого процесу доцільно також використовувати інший варіант безрозмірних комплексів, в якому як величини з незалежною розмірністю прийняті ρ , ω , D .

Рівняння безрозмірних напірної, моментної та потужностної характеристик:

$$k_{HT}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^* - \frac{(1-k)}{4} \lambda^2, \quad (12)$$

$$k_{MT}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)}{4} \lambda^2 k_Q^*, \quad (13)$$

$$k_{HT}^* = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(m \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)\lambda^2}{4} k_Q^*. \quad (14)$$

З порівняння (13) і (14) випливає: $k_{HT}^* = k_{HT}^*$.

За обчисленими параметрами елементарних решіток за допомогою формул посередництва, наведених у [18; 19] знаходяться параметри просторових решіток РК.

Для кожної з елементарних решіток РК справедливе рівняння зв'язку циркуляцій (4). Помножуючи обидві частини рівняння на $\frac{dQ}{Q}$ і інтегруючи по всіх елементарних решітках знаходимо:

$$\bar{\Gamma}_2 = k_{cp} \bar{\Gamma}_1 - (1-k_{cp}) \bar{q} \text{ctg} \tilde{\beta}_{02} + (1-k_{cp}) 2\pi \bar{r}_a^2 \omega, \quad (15)$$

де

$$\bar{q} = \frac{1}{Q} \int q dQ; \text{ctg} \tilde{\beta}_{02} = \frac{\int q \text{ctg} \beta_{02} dQ}{\int q dQ}; \frac{\bar{r}_a^2}{R^2} = \frac{1}{Q} \int \left(\frac{r_a}{R} \right)^2 dQ.$$

Приймаємо

$$\bar{q} = \frac{1}{Q} \int q dQ = \frac{Q}{\Delta_2}. \quad (16)$$

$$\Lambda = \frac{\bar{r}_a^2}{R^2} = \sqrt{\frac{1}{Q} \int \left(\frac{r_a}{R} \right)^2 dQ}. \quad (17)$$

$$\mu = \frac{\text{ctg} \tilde{\beta}_{02} D}{\Delta_2} = \frac{D \int q \text{ctg} \beta_{02} dQ}{Q^2}. \quad (18)$$

Враховуючи

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta_2} = 2\pi r_2 C_{2m} = 2\pi r_2 B_2 Q,$$

$B'_2 = B_2 D^2$ знаходимо:

$$\tilde{\mu} = \frac{2\pi}{Q} \int r_2' B_2' \text{ctg} \beta_{02} dQ, \quad (19)$$

$$\tilde{\Delta}'_2 = \frac{\tilde{\Delta}_2}{D} = \frac{Q}{2\pi \int r_2' B_2' dQ}. \quad (20)$$

При розбивці лопатевої системи РК на n елементарних решіток формули для визначення гідродинамічних параметрів просторових решіток РК можуть бути перетворені до зручного для розрахунків виду:

$$\Lambda^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_{a_i}^2}{R^2} \right), \quad (21)$$

$$\tilde{\Delta}'_2 = \frac{n}{2\pi \sum_{i=1}^n r_2' B_2'} = \frac{n}{n^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta_{2i}}}, \quad (22)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{2\pi}{n} \sum_{i=1}^n r_2' B_2' \text{ctg} \beta_{02_i} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{\text{ctg} \beta_{02_i}}{\Delta_{2i}}, \quad (23)$$

$$B'_2 = \frac{1}{2\pi r_2' \Delta_{2i} n}. \quad (24)$$

На рис. 2 показані прямі $\frac{\Gamma_2}{n_i} = f(K_Q^*)$ при

$\left(\frac{\Gamma_0 D}{Q} \right)_{\text{опт}} = \text{const}$, для трьох решіток (втулкова, середня, периферійна) та відповідні теоретичної

залежності з $\frac{\Gamma_2}{n_i} = \frac{\pi^2}{60} \lambda^2 - \frac{\pi}{30} \mu k_Q^*$, а також дослідні

дані просторової решітки для РО500 і ПО500. Відрізок ОА визначає параметр розгінного режиму на

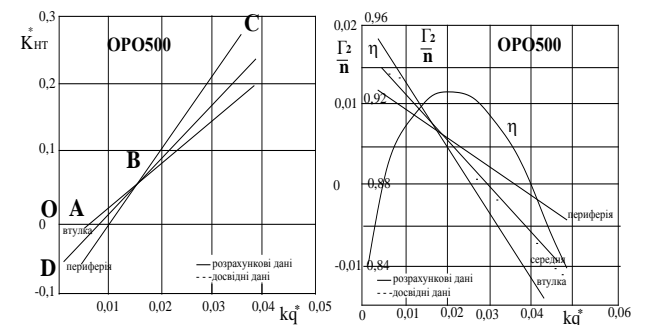
заданому відкритті $\tilde{\alpha}_0$: $K_{HT}^* \Big|_{k_Q^*=0} = \frac{\pi \Lambda^2}{2 \left(\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} + \mu \right)}$.

Робочі режими для цього відкриття розміщені на ділянці ВС. Параметри Λ для даних елементарних решіток визначаються відрізками OD, відсікаються

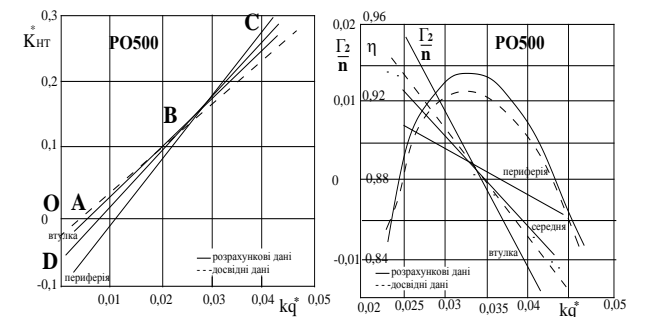
прямими осі ординат, $K_{HT}^* \Big|_{k_Q^*=0} = \frac{\Lambda^2}{4}$. Різні величини

параметра μ дають різні кути нахилу прямих $K_{HT}^* = f(k_Q^*)$ [18]. Розрахункова величина K_{HT}^* на

оптимальному режимі приблизно однакова для всіх елементарних решіток і добре узгоджується з величиною отриманої з дослідних даних.



a



б

Рис. 2. Залежності $K_{HT}^* = f(k_Q^*)$, $\eta = f(k_Q^*)$, $\frac{\Gamma_2}{n_i} = f(K_Q^*)$:

a – OPO500; б – PO500

Для більш досконального дослідження оборотної гідромашини ОРО500 було проведено чисельне дослідження на мікрорівні за допомогою програми CFD, що дозволило отримати розподіл швидкостей в проточній частині в турбінному режимі при оптимальних значеннях витрати та обертів (рис. 3).

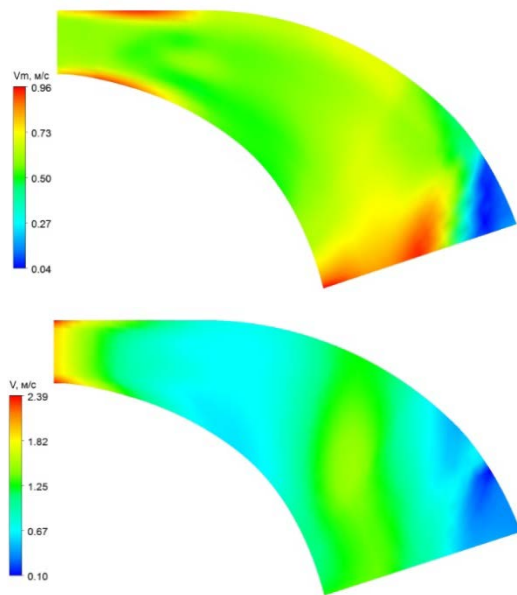


Рис. 3. Розподіл компонентів швидкості в меридіональному перетині лопаті робочого колеса (меридіональна і відносна)

Проведений чисельний аналіз просторової течії в'язкої рідини в робочих колесах оборотної гідромашини з використанням програмного комплексу CFD дозволив детально дослідити особливості течії, такі як розподіл швидкості, тиску та кутів потоку. Результати підтвердили сталий характер течії вздовж вихідної кромки РК, що свідчить про високу узгодженість елементарних решіток, забезпечуючи оптимальний режим роботи. Це дозволяє досягти високих енергетичних показників гідромашини та підтвердило ефективність запропонованого підходу до проектування лопатевих систем.

Використання безрозмірних параметрів для розрахунку гідродинамічних характеристик у характерних перетинах ПЧ та вздовж ліній течії у РК дозволяє глибше вивчити закономірності робочого процесу та оцінити вплив геометрії робочих органів на енергетичні характеристики. Уточнення розрахунків можливе завдяки застосуванню програм чисельного моделювання просторової течії. Вибір найбільш ефективного методу залежить від стадії проектування проточної частини та конкретних задач дослідження.

Висновки. Аналіз РК у широкому діапазоні змін напору з високими енергетичними показниками показав, що оптимальний режим досягається за умови приблизно однакової величини позитивної циркуляції для всіх решіток. Описана методика розрахунку та аналізу гідродинамічних характеристик окремих решіток дає змогу оцінити їхній вплив на енергетичні показники та кавітаційні властивості РК оборотної гідромашини.

Список літератури

1. *Новий план: як Україна планує досягти 27 % ВДЕ до 2030 року.* URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3904702-novij-plan-ak-ukraina-planue-dosagti-27-vde-do-2030-roku.html> (дата звернення: 08.11.2024).
2. *Уряд України затвердив Національний план дій з відновлюваної енергетики, а також ухвалив рішення про проведення аукціону на будівництво нових потужностей ВДЕ до 110 МВт та конкурсу на будівництво 700 МВт генеруючої потужності високоманеврових електростанцій.* URL: [https://eba.com.ua/uryad-ukrayiny-zatverdyy-natsionalnyj-plan-dij-z-vidnovlyvanoyi-energetyky-a-takozh-uhvalyv-rishennya-pro-provedennya-auksionu-na-budivn/](https://eba.com.ua/uryad-ukrayiny-zatverdyy-natsionalnyj-plan-dij-z-vidnovlyvanoyi-energetyky-a-takozh-uhvalyv-rishennya-pro-provedennya-auksionu-na-budivnytstvo-novyh-potuzhnostej-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/) (дата звернення: 08.11.2024).
3. *Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання.* URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.11.2024).
4. *Україна – енергетичний хаб Європи. Уряд схвалив Енергетичну стратегію до 2050 року.* URL: <https://mev.gov.ua/novyna/ukrayina-enerhetychnyy-khab-yevropy-uryad-skhvalyv-enerhetychnu-stratehiyu-do-2050-roku> (дата звернення: 10.11.2024).
5. Sokol Ye., Cherkashenko M., Drankovskiy V. Control and energy models of reversible hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No. 2. P. 4–11. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.01
6. Рябенко О. А., Клюха О. О., Тимошук В. С. Роль ГАЕС в роботі енергосистем. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* Київ. 2014. № 2. С. 167–170.
7. Кучерява І. М., Сорокіна Н. Л. Шляхи регулювання графіків навантаження та управління споживанням електричної енергії. *Гідроенергетика України.* 2007. № 4. С. 36–44.
8. Ландау Ю. О. Основні тенденції розвитку гідроенергетики України. *Наукові роботи.* Харків. 2014. Т. 53, вип. 40. С. 82–86.
9. Sun H., Xiao R. F., Yang W., Liu W. C. The optimal model of misaligned guide vanes for a particular pump-turbine. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Vol. 15 (19–23 August 2012, Beijing, China).* doi: 10.1088/1755-1315/15/3/032037
10. 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
11. Stefan D., Rudolf P. Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fields in a Draft Tube Cone of the Francis (Tokke) Turbine Model. *Journal of Physics: Conference Series.* 2015. Vol. 579.
12. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 7 (1229). P. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
13. Дедков В. М. Визначення розрахункових параметрів оборотних гідромашин для діапазону напорів $H = 70\text{--}700$ м. *Проблеми машинобудування.* 2008. Т. 11, № 1. С. 7–11.
14. Hasmatuchi V. *Hydrodynamics of a pump-turbine operating at off-design conditions in generating mode.* Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne, 2012. 168 p.
15. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering.* 2015. Vol. 5. P. 399–410.
16. Khorev O. Numerical study of fluid flow in a spiral chamber of aradial-axial hydraulic machine. *East European Journal of Advanced Technology.* 2013. No. 1/8. P. 41–45.
17. Тиньянова І. І., Рєзва К. С., Дранковський В. Е. Визначення гідродинамічних характеристик оборотних гідромашин на основі методів математичного моделювання. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2021. No. 1. P. 58–66. doi: 10.20998/2411-3441.2021.1.07
18. Дранковський В. Е., Миронов К. А., Тиньянова І. І., Рєзва К. С., Крупа Є. С., Кухтенков Ю. М. *Математичне моделювання робочого процесу гідромашин: монографія.* Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 406 с.
19. Количев В. О., Дранковський В. Е., Маруховський М. Б. *Розрахунок гідродинамічних характеристик напрямних апаратів гідротурбіни.* Харків: НТУ «ХПІ», 2002. 216 с.

20. Tynianova I., Rezvaya K., Drankovskiy V., Savenkov D., Tynianov O. Design of highly efficient water passage of pump-turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 2. P. 38–43. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.05

References (transliterated)

- Novyy plan: yak Ukrayina planuye dosyagty 27 % VDE do 2030 roku [New plan: how Ukraine plans to reach 27 % of RES by 2030]. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3904702-noviy-plan-ak-ukraina-planue-dosagti-27-vde-do-2030-roku.html> (accessed 08.11.2024).
- Uryad Ukrainy zatverdyy Natsional'nyy plan diy z vidnovlyuvanoyi enerhetyky, a takozh ukhvalyv rishennya pro provedennya auktsionu na budivnytstvo novykh potuzhnostey VDE do 110 MVt ta konkursu na budivnytstvo 700 MVt heneruyuchoyi potuzhnosti vysokomanevrovyykh elektrostantsiy [The Government of Ukraine approved the National Renewable Energy Action Plan and decided to hold an auction for the construction of new renewable energy facilities up to 110 MW and a tender for the construction of 700 MW of highly manoeuvrable power plants]. Available at: <https://eba.com.ua/uryad-ukrayiny-zatverdyy-natsionalnyj-plan-diy-z-vidnovlyuvanoyi-energetyky-a-takozh-uhvalyv-rishennya-pro-provedennya-auktsionu-na-budivnytstvo-novykh-potuzhnostey-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/> (accessed 08.11.2024).
- Pro zatverdzhennya Natsional'noho planu diy z vidnovlyuvanoyi enerhetyky na period do 2030 roku ta planu zakhodiv z yoho vykonannya [On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030 and the action plan for its implementation]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (accessed 10.11.2024).
- Ukrayina – enerhetychny khab Yevropy. Uryad skhvalyv Enerhetychnu stratehiyu do 2050 roku [Ukraine is the energy hub of Europe. The government has approved the Energy Strategy until 2050]. Available at: <https://mev.gov.ua/novyna/ukrayina-enerhetychny-khab-yevropy-uryad-skhvalyv-enerhetychnu-stratehiyu-do-2050-roku> (accessed 10.11.2024).
- Sokol Ye., Cherkashenko M., Drankovskiy V. Control and energy models of reversible hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 2, pp. 4–11. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.01
- Ryabenko O. A., Klyukha O. O., Tymoshchuk V. S. Rol' HAES v roboti enerhosystem [The role of PSP in the operation of power systems]. *Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. Kyiv. 2014, no. 2, pp. 167–170.
- Kucheryava I. M., Sorokina N. L. Shlyakhy rehulyuvannya hrafikiv navantazhennya ta upravlinnya spozhyvanniam elektrychnoyi enerhiyi [Ways of adjusting load schedules and controlling the consumption of electric energy]. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2007, no. 4, pp. 36–44.
- Landau Yu. O. Osnovni tendentsiyi rozvytku hidroenerhetyky Ukrainy [The main trends in the development of hydropower in Ukraine]. *Naukovi roboty*. Kharkiv. 2014, vol. 53, issue 40, pp. 82–86.
- Sun H., Xiao R. F., Yang W., Liu W. C. The optimal model of misaligned guide vanes for a particular pump-turbine. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*. Vol. 15 (19–23 August 2012, Beijing, China). doi: 10.1088/1755-1315/15/3/032037
- Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynianova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination of the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul)*. Istanbul, 2020, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
- Stefan D., Rudolf P. Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fields in a Draft Tube Cone of the Francis (Tokke) Turbine Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015, vol. 579.
- Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynianova I. The numerical reseach of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 7 (1229), pp. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
- Dyedkov V. M. Vyznachennya rozrakhunkovykh parametriv oborotnykh hidromashyn dlya diapazonu naporiv $H = 70\text{--}700\text{ m}$ [Determination of the design parameters of reversible hydraulic machines for the range of head $H = 70\text{--}700\text{ m}$]. *Problemy mashynobuduvannya*. 2008, vol. 11, no. 1, pp. 7–11.
- Hasmatuchi V. *Hydrodynamics of a pump-turbine operating at off-design conditions in generating mode*. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne Publ., 2012. 168 p.
- Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015, vol. 5, pp. 399–410.
- Khorev O. Numerical study of fluid flow in a spiral chamber of aradial-axial hydraulic machine. *East European Journal of Advanced Technology*. 2013, no. 1/8, pp. 41–45.
- Tyn'yanova I. I., Ryezva K. S., Drankovskyy V. E. Vyznachennya hidrodinamichnykh kharakterystyk oborotnykh hidromashyn na osnovi metodiv matematychnoho modelyuvannya [Determination of hydrodynamic characteristics of reversible hydraulic machines based on mathematical modeling methods]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1, pp. 58–66. doi: 10.20998/2411-3441.2021.1.07
- Drankovskyy V. E., Myronov K. A., Tyn'yanova I. I., Ryezva K. S., Krupa Ye. S., Kukhtenkov Yu. M. *Matematychnye modelyuvannya robochoho protsesu hidromashyn: monohrafiya* [Mathematical modelling of the hydraulic machine workflow]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022. 406 p.
- Kolychev V. O., Drankovskyy V. E., Marakhovskyy M. B. *Rozrakhunok hidrodinamichnykh kharakterystyk napryamnykh aparativ hidroturbiny* [Calculation of the hydrodynamic characteristics of the wicket gate of the hydraulic turbine]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2002. 216 p.
- Tynianova I., Rezvaya K., Drankovskiy V., Savenkov D., Tynianov O. Design of highly efficient water passage of pump-turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 2, pp. 38–43. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.05

Надійшла (received) 30.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тиньянова Ірина Іванівна (Tynianova Irina) – 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/0000-0003-1185-3458>; e-mail: t.irinai@ukr.net

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

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

Коцюрuba Мирослава Костянтинівна (Kotsiuruba Myroslava) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: myroslava.kotsiuruba@mit.khpi.edu.ua

Невинний Ілля Сергійович (Nevynnyi Illia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: illia.nevynnyi@mit.khpi.edu.ua