

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

РЕЗВА КСЕНІЯ СЕРГІЇВНА



УДК 621.224

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ВИСОКОНАПРНИХ
ОБОРОТНИХ ГІДРОМАШИН НА ОСНОВІ ЧИСЕЛЬНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Дранковський Віктор Едуардович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри «Гідравлічні машини
ім. Г. Ф. Проскури».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Панченко Анатолій Іванович,
Таврійський державний агротехнологічний
університет, Мелітополь, завідувач кафедри
«Мехатронні системи та транспортні технології»;

кандидат технічних наук
Рябова Світлана Олександрівна,
АТ «Турбоатом», Харків, інженер-конструктор
I категорії СКБ «Турбогідромаш».

Захист відбудеться «11» квітня 2019 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 04 березня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні спостерігається тенденція зростання споживання електричної енергії у середньому щорічно на 0,8 % за даними ЕІА (Energy Information Administration). У сучасних умовах розвитку світової енергетики пріоритетними стають відновлювані джерела енергії, що задовольняють потреби споживачів та зменшують негативний вплив на оточуюче середовище. Гідроенергетика є одним із важливих джерел електроенергії.

Існують значні переваги та особливості використання гідроакumuлюючих електростанцій (ГАЕС), а саме: використовують відновлювану енергію; виробляють дешеву електроенергію; незначною мірою впливають на оточуюче середовище в порівнянні з іншими виробниками; гідросилове обладнання відрізняється найкращими маневреними характеристиками (можливість швидкого включення і виключення агрегатів з роботи, а також швидкої зміни їх характеристик у часі з наявністю піків та провалів у електроспоживанні); використання ГАЕС в енергетичних системах у поєднанні з вітровими та сонячними станціями.

На даний час проектування та будівництво високонапірних ГАЕС є важливою задачею для вітчизняної гідроенергетики. Науково обґрунтований розвиток гідроенергетики неможливий без вдосконалення технологій проектування нових та модернізації існуючих агрегатів ГАЕС з використанням нових методів розрахунку течії в елементах проточних частин. Є достатньо накопичених даних про оборотні гідромашини середньої швидкохідності (на напори до 200 м), та виникає необхідність проведення наукових досліджень насос-турбін на більші напори, бо ефективність високонапірних оборотних гідромашин у порівнянні з іншими у 1,5 рази вище за рахунок зменшення об'єму водосховища та вагових показників агрегатів. Тому розробка та дослідження проточних частин високонапірних оборотних гідромашин з високими енергетичними показниками є важливою, актуальною науково-практичною задачею сьогодення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у рамках держбюджетної НДР МОН України «Розробка теоретичних основ синтезу гідравлічних машин, у тому числі гідротурбін та інших технологічних об'єктів автоматизації» (ДР № 0115U000513), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Мета наукового дослідження – удосконалення проточних частин високонапірних оборотних гідромашин за рахунок розробки методів розрахунку та аналізу їх гідродинамічних характеристик.

Відповідно до поставленої мети були поставлені наступні задачі:

1. проаналізувати методи дослідження гідродинамічних процесів у проточних частинах високонапірних оборотних гідромашин;
2. визначити гідродинамічні характеристики елементів проточної частини та кінематичні характеристики лопатевої системи на основі методу осереднених безрозмірних параметрів та визначити основні закономірності впливу геометричних параметрів проточної частини на показники роботи оборотної гідромашини;
3. провести систематичне чисельне дослідження просторової течії в елементах проточної частини для розрахунку енергетичних параметрів оборотних

гідромашин та визначити раціональні параметри розрахункової моделі: тип та розмір розрахункової сітки, модель турбулентності, граничні умови;

4. провести порівняльний аналіз результатів розрахунків за допомогою методу осереднених безрозмірних комплексів та методу чисельного дослідження з експериментом та результатами, отриманими іншими авторами;

5. визначити доцільності застосування методів моделювання та сформулювати рекомендації щодо вибору методу;

6. визначити оптимальний режим роботи гідромашини з метою зменшення втрат енергії шляхом зміни геометричних параметрів елементів проточної частини в турбінному режимі.

Об'єктом дослідження є робочий процес в проточній частині високонапірної оборотної гідравлічної машини.

Предмет дослідження – гідродинамічні характеристики в елементах проточної частини високонапірної оборотної гідромашини.

Методи дослідження. Поставлені в роботі завдання вирішувались на основі теорії подібності гідромашин та теорії лопатевих гідромашин. При побудові математичної моделі використаний блочно-ієрархічний підхід. У розрахунках застосовувався метод осереднених безрозмірних параметрів. Чисельне моделювання робочого процесу в проточних частинах здійснювалося із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки, які реалізовані в CFD.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше використано метод осереднених безрозмірних параметрів, що дозволяє визначити гідродинамічні характеристики окремих елементів проточної частини високонапірної оборотної гідромашини на напори 200 та 500 м;

– набула подальшого розвитку математична модель робочого процесу гідромашини на основі блочно-ієрархічного підходу, яка, на відміну від існуючої, дозволяє провести розрахунки гідродинамічних, кінематичних та енергетичних характеристик оборотних гідромашин як в турбінному, так і в насосному режимах роботи;

– вперше встановлені закономірності впливу геометричних параметрів підводу на величину і характер зміни коефіцієнту втрат в елементах проточної частини, що дозволяє визначити оптимальний режим роботи високонапірної оборотної гідромашини в турбінному режимі;

– вперше розроблено просторову модель високонапірної оборотної гідромашини на 200 та 500 м і виконано чисельне моделювання просторової течії в їх проточних частинах з використанням CFD, що дозволило визначити достовірні енергетичні характеристики.

Практичне значення отриманих результатів для гідромашинобудування:

1. Результати моделювання гідродинамічних характеристик із використанням методу осереднених безрозмірних параметрів дозволяють з достатньою точністю прогнозувати характеристики високонапірних оборотних гідромашин.

2. Результати визначення основних гідродинамічних і енергетичних параметрів гідромашин в залежності від її геометрії проточних частин дають можливість істотно підвищити якість проектування оборотних гідромашин та визначити оптимальний режим їх роботи.

3. Отримані результати чисельного моделювання з використанням програмного комплексу CFD дають змогу оцінити енергетичні характеристики високонапірних оборотних гідромашин, підвищити якість дослідження потоку рідини та скоротити терміни проектування.

4. Результати досліджень впроваджені в навчальний процес на кафедрі гідравлічних машин НТУ «ХПІ» в курсах «Основи систем автоматичного проектування лопатевих гідромашин», «Системи автоматичного проектування гідротурбін, оборотних гідромашин, малих, міні- та мікрогідроелектростанцій», «Математичне моделювання робочого процесу гідромашин і гідроприводів» та прийняті для використання в практиці в ОП Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків) та ТОВ «Гідрогазмаш» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведений аналіз існуючих методів гідродинамічних розрахунків та зроблені узагальнюючі висновки; проведені розрахунки втрат в елементах проточної частини оборотної гідромашини за допомогою методу осереднених безрозмірних параметрів; визначено вплив геометричних параметрів елементів проточної частини на величину коефіцієнту теоретичного напору, коефіцієнту втрат та гідравлічного ККД; виконана підготовка та проведені CFD розрахунки, їх обробка і аналіз; дано обґрунтування використання обраних методів для проектування нових або модернізації існуючих високонапірних оборотних гідромашин; визначено параметри оптимального режиму роботи високонапірних оборотних гідромашин; запропоновано модифікований варіант підводу тихохідної оборотної гідромашини ОРО500-В-100 з покращеними параметрами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались та обговорювались на Міжнародних науково-практичних конференціях: Магістрантів та аспірантів НТУ «ХПІ» (Харків, 2017); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2014-2018); «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Київ, 2016; Черкаси, 2017); «Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (Зміїв, 2015, 2017); 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (Харків, 2018).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, серед них 8 статей у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз даних (Google scholar, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Scientific Indexing Services та інші), 12 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, додатків. Повний обсяг дисертації 171 сторінок з них 74 рисунків за текстом, 6 таблиць за текстом, список використаних джерел з 172 найменувань на 20 сторінках, 4 додатки на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячений аналізу тенденції розвитку гідроенергетики у світі та в Україні.

Представлено основні напрямки роботи в галузі гідроенергетики, які дають змогу реалізувати необхідні резерви в об'єднаній енергетичній системі нашої країни. Проаналізувавши нинішній стан та перспективи розвитку об'єднаної енергосистеми стало можливим передбачити функції гідроакumuлюючих електростанцій, які значно розширились. ГАЕС добре зарекомендували себе і як складова частина сонячних та вітрових станцій.

Визначено, що для розробки нових або модернізації існуючих оборотних гідромашин доводиться вирішувати цілий комплекс задач. Для вирішення таких задач використовуються різні методи розрахунку обтікання лопатевих систем, за допомогою яких визначаються гідравлічні втрати енергії, ККД, кавітаційні показники, а також гідродинамічні сили і моменти, що діють на елементи ПЧ на заданих режимах роботи гідромашини. Ефективне вирішення цих задач можливо на основі вивчення робочого процесу гідромашини. Таким чином можна стверджувати, що розвиток розрахункових методів дослідження робочого процесу є одним з основних задач теорії гідромашин.

Проаналізовано сучасні методи розрахунку гідродинамічних та енергетичних характеристик оборотних гідромашин на основі різних моделей течії. Підкреслено, що нині у практиці гідродинамічних розрахунків ПЧ застосовують методи, засновані на одно-, дво- і тривимірних моделях течії рідини. У працях І. Е. Етінберга, Б. С. Раухмана, Г. М. Моргунова, Ф. Т. Заболотного, В. І. Климовича та ін. показано застосування квазітривимірних і тривимірних моделей для розрахунку дослідження робочого процесу гідравлічних машин. Окрім просторових методів розрахунку, під час розроблення ПЧ використовують спрощені моделі течії. В роботах В. О. Количева, В. Е. Дранковського, М. Б. Мараховського та ін. наведено дані з розрахунку енергетичних характеристик гідромашин, які засновані на застосуванні осереднених безрозмірних параметрів потоку.

Вище зазначені методи використовують для проектування ПЧ гідравлічних турбін або насосів, але в теперішній час особливо актуальним стає питання створення методів та програм для дослідження оборотних гідравлічних машин. Особливості роботи оборотних машин (використовуючи одну ПЧ в турбінному та насосному режимах) суттєво збільшують вимоги до них. В роботах Ю. І. Федулова, А. В. Русанова, В. М. Дедкова, П. М. Сухореброго, О. М. Хорева розглянуті питання розробки та дослідження моделей ПЧ оборотних гідромашин для гідроакumuлюючих електростанцій середніх напорів. Г. І. Топаж, В. М. Селезньов, С. О. Шумілін досліджували особливості проектування та проводили дослідження ПЧ насос-турбін середньої швидкохідності для визначення енергетичних характеристик та балансу втрат з використанням новітніх систем автоматичного проектування.

Визначено, що при розробці та проектуванні елементів ПЧ оборотної гідромашини в повному обсязі необхідним є дослідження балансу енергії в турбінному та насосному режимах роботи (визначення повного ККД гідромашини):

$$\text{- турбінний режим } \eta = \frac{N_{\Gamma}}{N_3} = \eta_{\Gamma} \cdot \eta_o \cdot \eta_m ;$$

$$\text{- насосний режим } \eta = \frac{N_k}{N_3} = \frac{N_k}{N_r - \Delta N_o} \cdot \frac{N_r - N_o}{N_r} \cdot \frac{N_r}{N_3} = \eta_r \cdot \eta_o \cdot \eta_m.$$

Визначено, що основну долю втрат енергії складають гідравлічні втрати, які зменшують енергію рідини при проходженні через ПЧ гідравлічної машини. Гідравлічні втрати розрізняють за місцем виникнення (у спіральній камері (СК), лопатках статора, лопатках направляючого апарату (НА), робочому колесі (РК) або у відсмоктуючій трубі (ВТ)), а також умовно поділяють на види втрат за фізичною природою, такі як на тертя, кромкові, ударні, циркуляційні, вихрові та інші. В нерухомих елементах (СК, статор, НА, ВТ) втрати визначаються як:

$$h = \frac{(E_{\text{вх}}^* - E_{\text{вих}}^*)}{H},$$

де $E_{\text{вх}}^*$, $E_{\text{вих}}^*$ – значення осереднених за витратою повної питомої енергії рідини у

вхідному та вихідному перетинах елементу ПЧ, що розглядається ($E^* = \frac{\int E V_n dS}{Q}$,

V_n – нормальна до перетину проекція швидкості, S – площа перетину).

Для визначення гідравлічних втрат в РК застосовують:

$$\text{- в турбінному режимі } h = 1 - \frac{\omega \cdot M_{\text{об}}}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{рк}}};$$

$$\text{- в насосному режимі: } h = 1 - \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{рк}}}{\omega \cdot M_{\text{об}}},$$

де $\omega = \frac{\pi \cdot n'_I}{30}$ – кутова швидкість, $H_{\text{рк}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}}{\rho \cdot g}$ – напір, що виникає на РК, $M_{\text{об}}$ – обертаючий момент на РК.

Знаючи втрати енергії у кожному з елементів ПЧ, можна визначити гідравлічний ККД: $\eta_r = 1 - h_{\text{ск}} - h_{\text{ст}} - h_{\text{на}} - h_{\text{рк}} - h_{\text{вт}}$.

Таким чином, враховуючи особливості роботи оборотних гідромашин у двох режимах роботи, якісне прогнозування енергетичних характеристик при дослідженні робочого процесу можливе завдяки складанню балансу енергій з урахуванням об'ємних та дискових втрат.

У **другому розділі** представлено результати розрахунку із застосуванням методу осереднених безрозмірних параметрів. Даний метод дає змогу розрахувати енергетичні характеристики в турбінному і насосному режимах роботи високонапірних оборотних на перших етапах проектування. Математична модель течії на основі безрозмірних параметрів ($\frac{Q}{\omega D^3}$, $\frac{\bar{\Gamma}_1}{\omega D^2}$, $\frac{\bar{\Gamma}_2}{\omega D^2}$) в лопатевій системі дозволяє знаходити осереднені кінематичні параметри потоку у характерних перетинах ПЧ (рис. 1, 2).

Виявлено, що на підставі використання безрозмірних комплексів k_M^* , k_N^* , k_H^* , k_h^* (коефіцієнти моменту, потужності, теоретичного напору і втрат гідромашини

відповідно) стає можливим отримати складову модель опору ПЧ високонапірної гідромашини та застосувати її для розрахунку і аналізу енергетичних характеристик.

Зазначені комплекси є функціями, які залежать від наступних величин: $\frac{\bar{\Gamma}_0}{\omega D^2}$ – безрозмірний коефіцієнт осередненої циркуляції, що характеризує напрям потоку перед РК; $k_Q^* = \frac{Q}{\omega D^3}$ – узагальнений режимний параметр; L' – символічне позначення набору безрозмірних геометричних параметрів ПЧ. Можна записати дані комплекси наступним чином:

$$k_M^* = f_M^* \left(k_Q^*, \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, L' \right), k_N^* = f_N^* \left(k_Q^*, \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, L' \right), k_H^* = f_H^* \left(k_Q^*, \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, L' \right), \eta = f_\eta^* \left(k_Q^*, \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, L' \right).$$

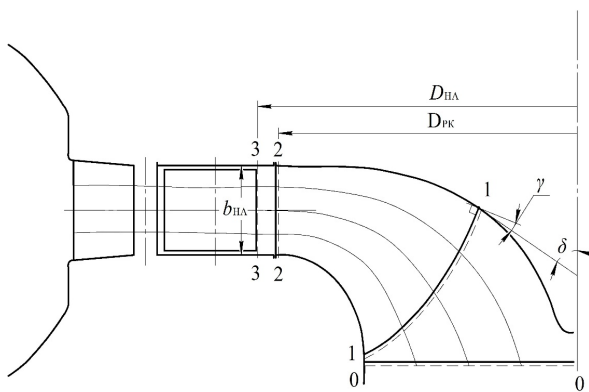


Рисунок 1 – Характерні перерізи ПЧ оборотної гідромашини для насосного режиму роботи: 0-0 – на виході з ВТ, 1-1 – на вході в РК, 2-2 – на виході з РК, 3-3 – на вході в НА

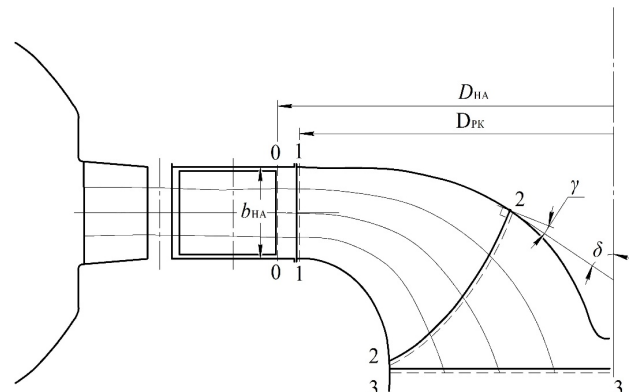


Рисунок 2 – Характерні перерізи ПЧ оборотної гідромашини для турбінного режиму роботи: 0-0 – на виході з НА, 1-1 – на вході в РК, 2-2 – на виході з РК, 3-3 – на вході у ВТ

Визначено, що для дослідження робочого процесу необхідна математичні моделі різного рівня. Тому розробка системи взаємопов'язаних моделей, які описують робочий процес на різних ієрархічних рівнях, є важливим напрямом у розвитку сучасних методів дослідження ПЧ.

Використано метод математичного опису робочого процесу гідромашини на основі блочно-ієрархічного підходу, який дозволяє використовувати взаємопов'язані між собою моделі різного рівня, що більше ефективно на ранніх етапах проектування ПЧ.

Описана структура робочого процесу високонапірної оборотної гідромашини на основі осереднених безрозмірних параметрів за допомогою рівнянь для розрахунку енергетичних параметрів оборотної гідромашини (рівняння балансу енергії та основного рівняння гідромашин). При цьому: поверхні токів меридіонального перерізу залишаються незмінними, об'ємні витоки не враховуються та коефіцієнт прозорості решіток має невелике значення.

В насосному режимі роботи оборотної гідромашини рівняння балансу енергії у безрозмірному вигляді визначається як

$$\bar{H}_{\text{теор}}^H = \bar{H}^H + k_{\text{підв}}^H + k_{\text{рк}}^H + k_{\text{відв}}^H, \quad (1)$$

де $\bar{H}_{\text{теор}}^{\text{H}}$ – коефіцієнт теоретичного напору оборотної гідромашини в насосному режимі; \bar{H}^{H} – коефіцієнт напору; $k_{\text{підв}}^{\text{H}}, k_{\text{РК}}^{\text{H}}, k_{\text{відв}}^{\text{H}}$ – безрозмірні коефіцієнти опорів в підводі, РК та відводі).

Коефіцієнти втрат енергії, що виражаються у відповідності до закону подібності для аналізу робочих процесів в оборотній гідромашині, можуть бути виражені за допомогою втрат в елементах ПЧ

$$k^{\text{H}} = g \cdot \frac{h}{\omega^2 \cdot D^2}, \quad (2)$$

де D – діаметр РК; h – втрати енергії; ω – кутова швидкість; Q – витрата.

Коефіцієнти напору в насосному режимі визначаються як

$$\bar{H}^{\text{H}} = g \cdot \frac{H}{\omega^2 \cdot D^2}. \quad (3)$$

З урахуванням залежностей (1) – (3) гідравлічний ККД в насосному режимі з основного рівняння гідромашин представляється у вигляді

$$\eta_{\text{Г}}^{\text{H}} = 1 - \frac{k^{\text{H}}}{\bar{H}_{\text{T}}^{\text{H}}}. \quad (4)$$

В турбінному режимі рівняння балансу енергії у безрозмірному вигляді має форму

$$\frac{g}{Q_I'^2} = k_H \cdot \eta_o^2 + k_{\text{підв}}^{\text{T}} + k_{\text{РК}}^{\text{T}} \cdot \eta_o^2 + k_{\text{відв}}^{\text{T}}, \quad (5)$$

де k_H – коефіцієнт напору в турбінному режимі, $\eta_o = \frac{Q_{\text{РК}}}{Q}$ – об'ємний ККД,

$Q_I' = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}}$ – приведена витрата, $k_{\text{підв}}^{\text{T}}, k_{\text{РК}}^{\text{T}}, k_{\text{відв}}^{\text{T}}$ – безрозмірні коефіцієнти

опорів в підводі, РК, відводі ($k^{\text{T}} = g \cdot \frac{h \cdot D^4}{Q^2}$).

Використовуючи основне рівняння гідромашин (рівняння Ейлера), яке визначає зв'язок між енергетичними та кінематичними параметрами, гідравлічний ККД в турбінному режимі записується як

$$\eta_{\text{Г}} = \frac{k_H}{g} \cdot Q_I'^2 \cdot \eta_o^2. \quad (6)$$

Встановлені закономірності впливу геометричних параметрів підводу оборотної гідромашини на величину і характер зміни коефіцієнту втрат в НА, так як роль НА у формуванні балансу енергій всієї ПЧ оборотної гідромашини є найбільш значною. Втрати в даному елементі перевищують втрати в СК зі статором. Необхідність такого дослідження виникає вже на перших етапах проектування ПЧ, коли виникає потреба обрати найбільш оптимальний кут потоку в СК ($\tilde{\alpha}_{\text{СП}}$), висоту НА (b_0/D) та форму профілю НА. Ці параметри значно впливають на значення коефіцієнту опору в НА. Наведені дані дають змогу зробити висновки про вплив вище зазначених параметрів на коефіцієнт втрат в НА. Збільшення кута $\tilde{\alpha}_{\text{СП}}$ призводить до зміщення мінімуму втрат в області великих значень $\tilde{\alpha}_0$.

Представлена математична модель втрат енергії в елементах ПЧ, що дозволяє скласти баланс енергії високонапірної оборотної гідромашини в різних режимах її роботи (рис. 3).

Представлена математична модель опорів в лопатевій системі ПЧ оборотної гідромашини. Дана модель дає змогу визначити втрати в РК (рис. 4). Ці втрати поділяються за природою виникнення: ударні, кромкові, циркуляційні, кінцеві, вихрові втрати та втрати на тертя. Їх знаходження дозволяє більш ретельно проаналізувати причини загальних втрат в лопатевій системі та в ПЧ в цілому.

Використовуючи метод осереднених параметрів стає можливим визначити кути потоку β_1 (кут атаки на вході в РК) та α_2 (кут потоку за РК) в характерних перетинах ПЧ в діапазоні основних робочих режимів. Лінії рівних кутів $\alpha_2 = \text{const}$ є лініями рівних відношень $n'_I/Q'_I = \text{const}$, тобто співпадають з променями, які виходять із початку координат. Кути β_1 та α_2 дають інформацію про обтікання лопатевої системи РК та про узгодження елементів ПЧ гідравлічної машини (рис. 5). В результаті проведених розрахунків будується поверхня гідравлічного ККД (рис. 6).

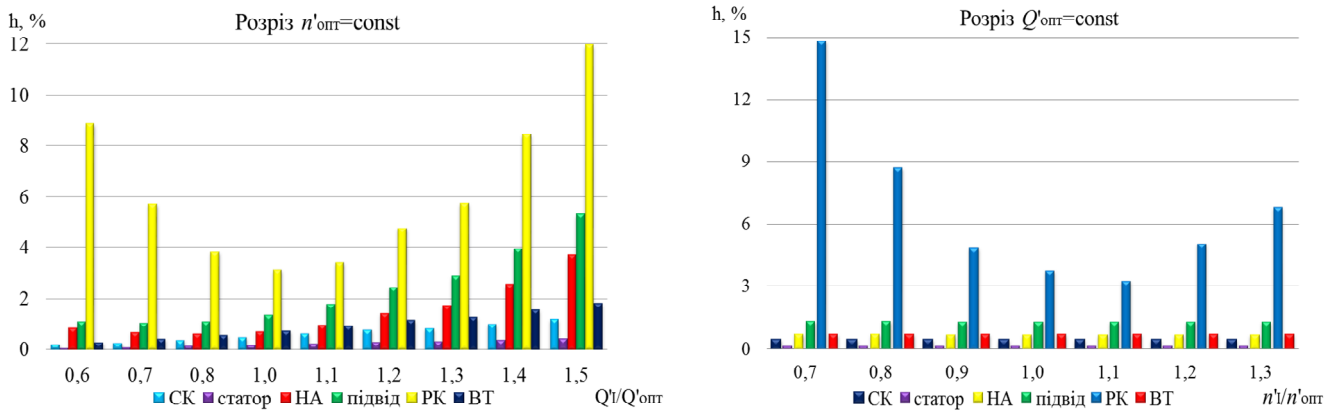


Рисунок 3 – Втрати енергії в елементах ПЧ ОРО200-В-100

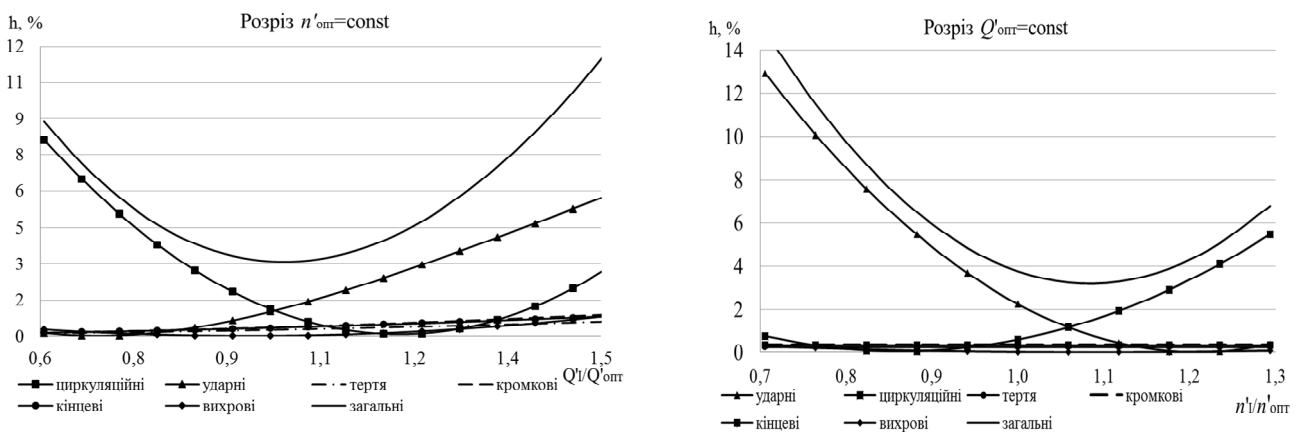


Рисунок 4 – Втрати енергії в РК за різною природою виникнення ОРО200-В-100

Відмічено, що метод дослідження потоку рідини в ПЧ оборотної гідромашини на основі осереднених безрозмірних параметрів доцільно використовувати на перших етапах проектування без створення об'ємної моделі для визначення оптимального режиму роботи гідромашини та прогнозування кінематичних і енергетичних характеристик.

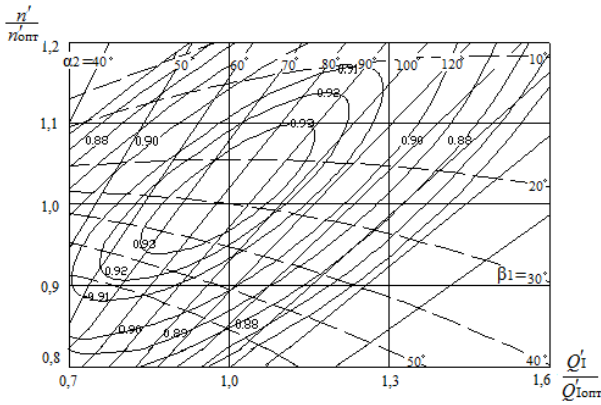


Рисунок 5 – Прогнозна характеристика ОРО200-В-100

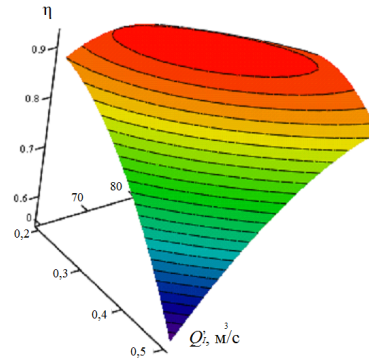


Рисунок 6 – Поверхня ККД ОРО200-В-100

Третій розділ присвячено чисельному дослідженню потоку рідини в ПЧ високонапірної оборотної гідромашини з використанням програмного пакету CFD.

Визначено переваги використання програмних комплексів для проведення гідродинамічних розрахунків. Дані комплекси дають змогу замінити фізичні експерименти на чисельне дослідження об'єкту, при цьому значно зменшуються матеріальні затрати та затрати часу.

Приведено методику проведення чисельного дослідження (рис. 7). Описано основні етапи, визначені особливості проведення розрахунку ПЧ оборотної гідромашини.

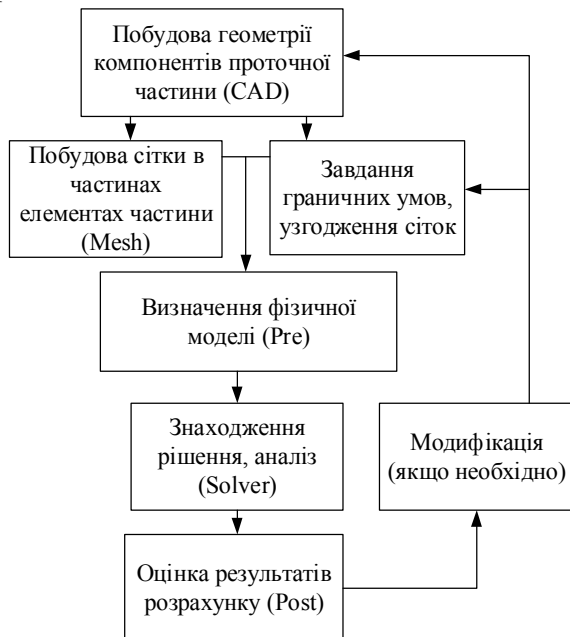


Рисунок 7 – Алгоритм розрахунку просторової течії рідини за допомогою пакету програм CFD

На першому етапі необхідним є створити твердотільну модель просторової течії (рис. 8).

Якщо елементи ПЧ моделюються окремо або розрахунки проводяться з осередненими параметрами потоку під час переходу від одного компоненту до іншого, то можна вважати, що течія в усіх міжлопатевих каналах періодично повторювана, і для економії обчислювальних ресурсів доцільно моделювати тільки один канал. У цьому випадку необхідна побудова поверхонь періодичності. Таким способом можуть створюватися геометричні моделі лопаток статора, НА та лопатей РК.

Розрахунок течії рідини в ПЧ гідравлічної машини в сучасних програмних продуктах виконується шляхом чисельного рішення системи рівнянь Нав'є-Стокса (7) і нерозривності (8):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0. \quad (8)$$

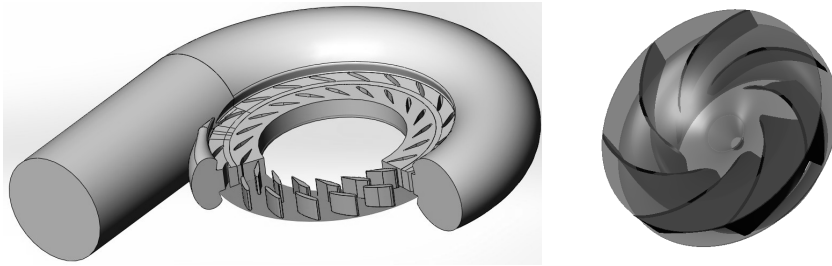


Рисунок 8 – Об'ємна модель

Після проведення тестових розрахунків в програмному комплексі CFD з використанням $k-\epsilon$ та SST моделей турбулентності для порівняння результатів з попередньо отриманими даними була обрана $k-\epsilon$ модель турбулентності. Дана модель менш вимоглива до обчислюваних ресурсів, що грає велику роль при проведенні великої кількості розрахункових досліджень, та забезпечує високу збіжність результатів з експериментальними даними.

Побудовані розрахункові сітки кожного елемента ПЧ оборотної гідромашини (рис. 9): гексаедральна, структурована сітка – НА та РК, неструктурована, тетраедральна – СК зі статором (у зв'язку зі складним характером геометрії) та О-сітки – ВТ. Загальна кількість комірок сітки становить 8,8 млн. Для отримання кращих результатів проводилось згущення в області крайок колон статора.

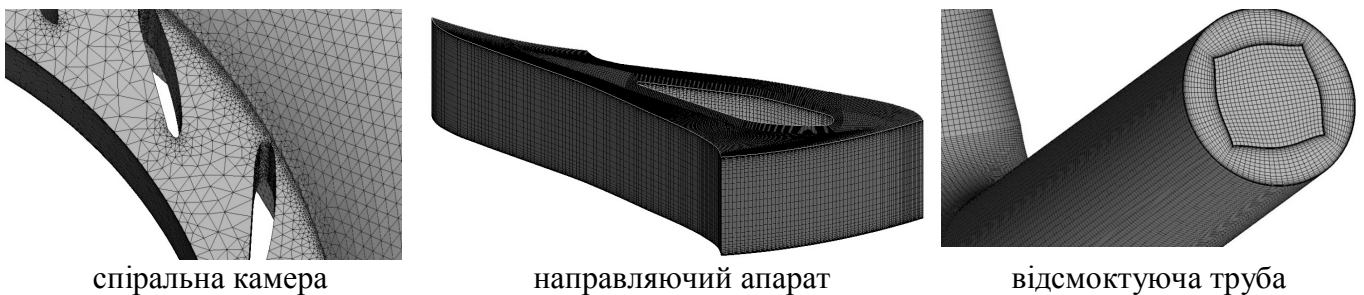


Рисунок 9 – розрахункова сітка в елементах ПЧ

В результаті проведення чисельного дослідження ПЧ оборотної гідромашини ОРО200-В-100 в турбінному та насосному режимах роботи були отримані наступні результати:

- визначені втрати в елементах ПЧ для складання балансу енергії в турбінному та насосному режимах (табл. 1, 2);
- визначені компоненти швидкості перед і за РК із розподілом по висоті каналу НА;
- проаналізовано розподіл абсолютної швидкості та тиску в СК зі статором, НА та ВТ, розподіл абсолютної та меридіональної швидкостей і тиску в РК;
- представлено характер течії у підводі у вигляді ліній току для візуалізації траєкторії руху;
- встановлено закономірність розподілу втрат в елементах: значну долю від усіх втрат в ПЧ оборотної гідромашини ОРО200-В-100 становлять втрати в РК (близько 56 %), на СК зі статором та НА відводиться близько 35-40 %.

Таблиця 1 – Втрати в елементах ПЧ ОРО200-В-100 в турбінному режимі роботи

a_0	n'_1	Q'_1	$\eta_r, \%$	$h_{ск+ст}, \%$	$h_{на}, \%$	$h_{вт}, \%$	$h_{рк}, \%$
$0,7a_{0опт}$	$0,9n'_{1опт}$	$0,73Q'_{1опт}$	85,77	0,65	2,93	2,03	8,62
	$n'_{1опт}$	$0,7Q'_{1опт}$	89,12	0,55	2,7	4,73	2,9
$a_{0опт}$	$0,9n'_{1опт}$	$1,05Q'_{1опт}$	85,27	1,3	1,69	3,13	8,61
	$n'_{1опт}$	$Q'_{1опт}$	91,53	1,27	1,55	2,35	3,26
	$1,2n'_{1опт}$	$0,92Q'_{1опт}$	86,32	1,53	1,31	6,57	4,27
$1,5a_{0опт}$	$0,9n'_{1опт}$	$1,42Q'_{1опт}$	81,86	2,0	1,19	7,17	7,78
	$n'_{1опт}$	$1,4Q'_{1опт}$	87,85	2,2	1,1	5,04	3,81
	$1,2n'_{1опт}$	$1,33Q'_{1опт}$	85,65	1,98	1,04	6,87	4,46

Таблиця 2 – Втрати в елементах ПЧ ОРО200-В-100 в насосному режимі роботи

a_0	n'_1	Q'_1	$\eta_r, \%$	$h_{підв}, \%$	$h_{рк}, \%$	$h_{відв}, \%$
$0,9a_{0опт}$	83	$0,72Q'_{1опт}$	85,7	2,5	4,45	7,35
	85	$0,88Q'_{1опт}$	90,3	2,14	3,25	4,31
	88	$1,06Q'_{1опт}$	88,8	2,24	2,9	6,06
$a_{0опт}$	86	$0,78Q'_{1опт}$	87,1	3,0	4,2	5,7
	87	$Q'_{1опт}$	92,0	1,98	2,98	3,09
	90	$1,18Q'_{1опт}$	88,7	2,45	2,9	5,95
$1,2a_{0опт}$	86	$0,84Q'_{1опт}$	86,3	2,14	3,5	8,06
	90	$1,09Q'_{1опт}$	91,6	2,24	2,6	3,56
	96	$1,31Q'_{1опт}$	92,1	3,2	3,0	1,7

У четвертому розділі представлений порівняльний аналіз отриманих результатів на прикладі високонапірних оборотних гідромашин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100.

На основі отриманих даних за допомогою обраних методів було проведено порівняльний аналіз з експериментальними даними оборотної гідромашини ОРО200-В-100 в турбінному режимі роботи (рис. 10).

Розглянуто втрати енергії при оптимальному відкритті НА. Було розраховано відносні значення ККД та визначено, що характер кривих аналогічний, похибка розрахункових відносно експериментальних даних склала 1,64 % (метод осереднених безрозмірних параметрів) та 1,27 % (метод просторової течії), що є допустимим. Все це свідчить про адекватність проведених досліджень та коректність отриманих результатів.

Проведено порівняння результатів насосного режиму роботи ОРО200-В-100. Були побудовані графіки відносних значень ККД у різних режимах роботи при $a_0 = \text{const}$ (рис. 11). Розглядалися три значення відкриття НА: $0,9a_{0опт}$, $a_{0опт}$, $1,2a_{0опт}$. Характер кривих, побудованих за даними CFD-розрахунку, схожий на характер кривих, оснований на експериментальних даних. Похибка розрахункових результатів у порівнянні з експериментальними склала 0,5 %, що свідчить про достовірність проведених розрахунків з використанням спеціального пакету програм CFD.

Проведено моделювання руху просторової течії в ПЧ тихохідної оборотної гідромашини ОРО500-В-100 на основі обраних методів. При чисельному розрахунку методом просторової течії було визначено втрати в елементах ПЧ та складено

баланс енергії. Розрахунок проведено для трьох режимів при оптимальному відкритті лопаток НА. На рис. 12 представлено результат порівняння. Похибка результатів розрахунку значення відносного ККД на основі 3D методу від експериментальних даних склала 0,4 %; на основі методу осереднених безрозмірних параметрів – 1,8 %.

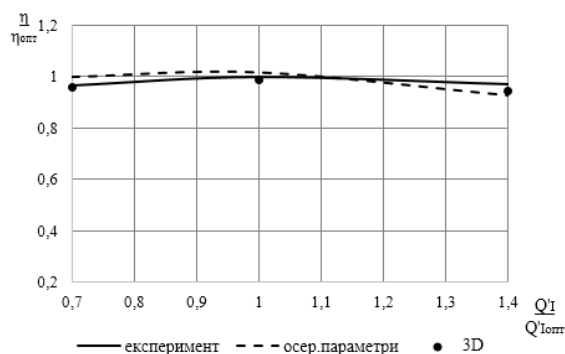


Рисунок 10 – Графік ККД ОРО200-В-100 (турбінний режим)

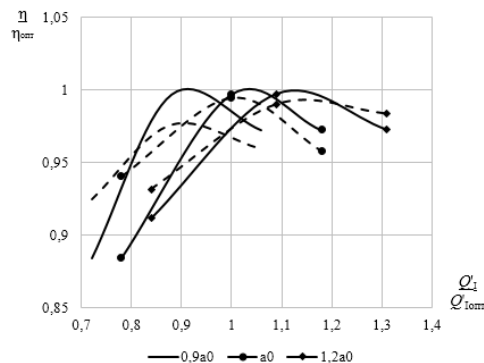


Рисунок 11 – Графік ККД ОРО200-В-100 (насосний режим)

Розрахунки за допомогою методу осереднених безрозмірних параметрів дозволили побудувати прогнозу характеристику ПЧ, на якій нанесено ізолінії гідравлічного ККД та лінії кутів β_1 та α_2 , які характеризує потік перед і за РК відповідно (рис. 13).

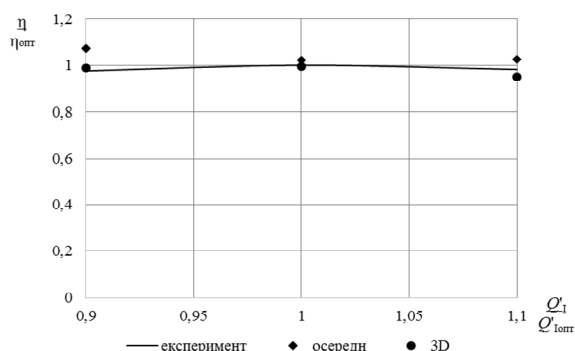


Рисунок 12 – Графік ККД ОРО500-В-100 в турбінному режимі роботи (базовий варіант)

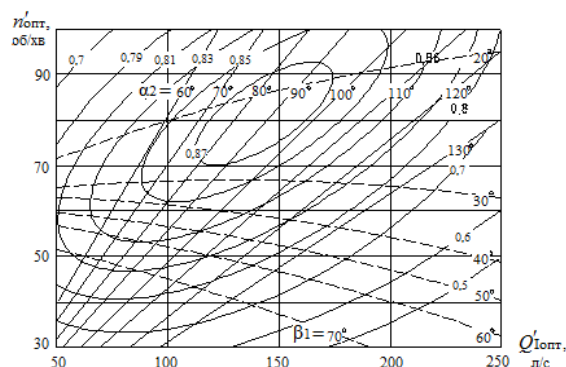


Рисунок 13 – Прогнозна характеристика роботи ОРО500-В-100 (базовий варіант)

В результаті аналізу балансу енергії встановлено, що втрати в елементах підводу ПЧ (СК, статор та НА) тихохідної високонапірної оборотної гідромашини ОРО500-В-100 складають більшу частину із загальних, а саме 62 %. Тому підвищення енергетичних якостей насос-турбіни можливе за рахунок модифікації СК, колон статору та лопаток НА. Запропоновано другий варіант підводу, у якому СК розширена, кут течії в СК збільшився на 10° , число колон статору та лопаток НА зменшено до 16, профіль лопаток НА стовщений, діаметр розташування осей повороту лопаток НА збільшено в 1,05 рази. Проведено розрахунки модифікованого варіанту ПЧ ОРО500-В-100, побудовано прогнозу характеристику роботи (рис. 14).

Визначено параметри оптимального режиму роботи високонапірної оборотної гідромашини. Дана задача зводиться до знаходження гідродинамічних параметрів, що максимізують цільову функцію (9) при функціональному обмеженні (10) та

прямих обмежень на керуючі параметри $\lambda > 0, \mu > 0, \mu_m > 0, y > 0, K_{r_1} > 0, K_{r_2} > 0,$
 $y_{сп} = 0, ctg\alpha_2 > 0.$

$$\eta_r = \frac{k_{HT}}{g} Q_I'^2 \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L' \right); \quad (9)$$

$$Q_I'^2 \left[k_{HT} \left(\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}, k_Q, L'_{PK} \right) + k_h \left(\frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q}, k_Q, L' \right) \right] - g = 0. \quad (10)$$

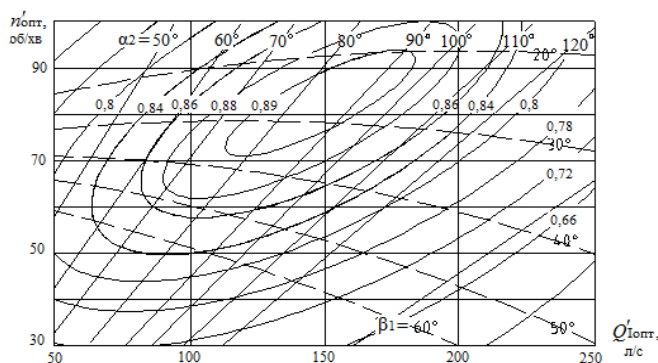


Рисунок 14 – Прогнозна характеристика роботи ОРО500-В-100(модифікований варіант)

Математичне формулювання задачі оптимізації представляється у вигляді: $\eta_r(n'_I, Q'_I, L') \rightarrow \max;$

$$F(n'_I, Q'_I, L') = 0; n'_I > 0; Q'_I > 0.$$

В результаті отриманих даних визначено, що загальний ККД збільшився на 2 %, що суттєво для тихохідних високонапірних оборотних гідромашин. Тому доцільно обрати другий варіант підводу для підвищення енергетичних якостей ПЧ.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес на кафедрі «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» НТУ «ХП»; акти прийняття для використання в практиці в ОП Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків) та ТОВ «Гідрогазмаш» (м. Харків); список публікації здобувача за темою дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача удосконалення проточних частин високонапірних оборотних гідромашин за рахунок розробки методів розрахунку та аналізу їх гідродинамічних характеристик.

Основні результати і висновки по даній роботі наступні:

1. Проаналізовано методи дослідження гідродинамічних процесів у проточних частинах високонапірних оборотних гідромашин. Виявлено, що накопичених раніше даних в практиці гідромашинобудування недостатньо для надійного визначення параметрів та складання балансу енергії у турбінному і в насосному режимах роботи, що є необхідним у дослідженні робочого процесу для якісного прогнозування енергетичних характеристик.

2. Визначено гідродинамічні характеристики елементів проточних частин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100 та кінематичні характеристики – кути потоку β_1 та α_2 , які дають інформацію про обтікання лопатевої системи робочого колеса та про узгодження елементів проточної частини. Приведено методика розрахунку робочого процесу високонапірної оборотної гідромашини на основі осереднених безрозмірних параметрів, яка дозволяє більш обґрунтовано підійти до вибору основних геометричних параметрів елементів проточної частини.

Визначено вплив геометричних параметрів на величину коефіцієнту теоретичного напору, коефіцієнту втрат, гідравлічного ККД та проаналізовано вид

теоретичної характеристики із використанням методу осереднених безрозмірних параметрів, що дозволяє на перших етапах проектування вибрати необхідні основні геометричні параметри проточної частини.

3. Проведено чисельне дослідження руху просторової течії в проточних частинах оборотних гідромашин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100, що дозволило визначити та візуалізувати картину течії в елементах проточної частини. На основі отриманих в роботі результатів надано рекомендації, щодо визначення параметрів розрахункової моделі: тип та розмір розрахункової сітки, модель турбулентності, граничні умови.

4. Проведено порівняльний аналіз результатів дослідження потоку в проточній частині оборотних гідромашин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100. Аналіз показав, що для ОРО200-В-100 отримані результати за допомогою 3D методу мають похибку 1,27 % (турбінний режим роботи) та 0,5 % (насосний режим роботи) відносно експериментальних даних. Похибка результатів, отриманих на основі методу осереднених безрозмірних параметрів, у порівнянні з експериментальними даними склала 1,64 %. Для ОРО500-В-100: отримані результати на основі 3D методу мають похибку відносно експериментальних даних 0,4 % (турбінний режим роботи); на основі методу осереднених безрозмірних параметрів – 1,8 %. Це свідчить про адекватність проведених досліджень, точність отриманих результатів.

5. Визначено доцільність застосування методів моделювання на певних етапах проектування. Метод осереднених безрозмірних параметрів ефективніше застосовувати на перших етапах дослідження проточної частини оборотної гідромашини для прогнозування кінематичних і енергетичних характеристик без створення об'ємної моделі. Для уточнення характеристик потоку в проточній частині та для візуального представлення розподілу компонентів швидкості, тиску в необхідних перетинах більш доцільно використовувати 3D метод, який може замінити фізичний експеримент і за короткий час дозволяє провести дослідження з мінімальними затратами.

6. Визначено параметри оптимального режиму оборотних гідромашин та складено баланс енергії. Аналіз балансу показав, що в проточній частині ОРО200-В-100 втрати в робочому колесі складають велику частину від загальних втрат (близько 56 %), а в ОРО500-В-100 втрати у підводі складають близько 62 % від загальних. Підвищення енергетичних показників тихохідної високонапірної оборотної гідромашини досягається за рахунок зміни геометрії елементів підводу.

Запропонований в роботі варіант проточної частини, в якому розширено спіральну камеру, зменшено кількість колон статору та лопаток НА до 16, дозволив краще узгодити елементи проточної частини, завдяки чому гідравлічний ККД збільшився на 2 %.

7. Результати дисертаційної роботи впровадженні у навчальному процесі НТУ «ХПІ» в курсах «Основи систем автоматичного проектування лопатевих гідромашин», «Системи автоматичного проектування гідротурбін, оборотних гідромашин, малих, міні- та мікрогідроелектростанцій», «Математичне моделювання робочого процесу гідромашин і гідроприводів» та прийняті для використання в практиці в ОП Корпорації «Гідроелекс» (м. Харків) та ТОВ «Гідрогазмаш» (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Резвая К. С. К расчету гидродинамических характеристик высоконапорной обратимой гидромашины в турбинном режиме работы на основе математического описания ее рабочего процесса / В. Э. Дранковский, К. С. Резвая. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – №3. – С. 125-129.

Здобувачем застосовано блочно-ієрархічний метод для описання робочого процесу оборотної гідромашини в турбінному режимі роботи.

2. Резвая К. С. Особенности рабочего процесса новых типов горизонтальных прямооточных и вертикальных радиально-осевых гидротурбин на высокие напоры / О. В. Потетенко, В. Э. Дранковский, Е. С. Крупа, К. С. Резвая // Вісник НУВГП. Ч. 1. Технічні науки. Вип. 3 (71). – Рівне : НУВГП. – 2015. – С. 281-285.

Здобувачем проведено аналіз робочих процесів гідротурбін на напори 400-600 м.

3. Резвая К. С. Применение блочно-иєрархического метода для определения гидродинамических характеристик обратимых гидромашин / В. Э. Дранковский, К. С. Резвая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – №45 (1154). – С. 60-63.

Здобувачем доведено доцільність застосування блочно-ієрархічного методу для описання робочого процесу оборотної гідромашини на перших етапах її проектування.

4. Rezvaya K. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode / V. E. Drankovskiy, K. S. Rezvaya, E. S. Krupa // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 20 (1192). – С. 53-57.

Здобувачем проведено чисельне дослідження потоку рідини в спіральній камері оборотної гідромашини в турбінному режимі роботи.

5. Rezvaya K. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine / K. Rezvaya, E. Krupa, V. Drankovskiy [та ін.] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 7 (1229). – P. 97-102.

Здобувачем детально проаналізовано характер потоку в підводі високонапірної гідротурбіни, визначено основні особливості потоку в спіральній камері.

6. Rezvaya K. S. Mathematical modeling of hydrodynamic characteristics in the inlet of a reversible hydraulic machine based on mathematical models / V. E. Drankovskiy, K. S. Rezvaya // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 22 (1244). – С. 23-30.

Здобувачем описаний вплив геометричних параметрів підводу на коефіцієнти опорів в розглянутих елементах.

7. Резва К. С. Дослідження високонапірних оборотних гідромашин / К. С. Резва, В. Е. Дранковський, І. І. Тиньянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 42(1264). – С. 84-88.

Здобувачем проведено розрахунки втрат енергії в елементах проточної частини. Зроблено порівняльний аналіз отриманих результатів.

8. Резвая К. С. Расчетное определение энергетических характеристик на основе расчета пространственного течения вязкой жидкости в обратимых гидравлических машинах / К. С. Резвая, Дранковский В. Э., Крупа Е. С. [и др.] // Вісник НТУ «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – № 17 (1293). – С. 43-49.

Здобувачем проведено дослідження балансу енергії в проточній частині оборотної гідромашини з використанням методу осереднених безрозмірних параметрів та методу просторової течії.

9. Резвая К. С. Математическое моделирование энергетических характеристик высоконапорных обратимых гидромашин / Дранковський В.Е., Резвая К.С. // Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – С. 265.

Здобувачем проведено аналіз існуючих методів математичного моделювання енергетичних характеристик високонапірних оборотних гідромашин.

10. Резвая К. С. Баланс энергий высоконапорных обратимых гидромашин в турбинном режиме работы / Дранковський В.Е., Резвая К.С. // Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – С. 280.

Здобувачем проаналізовано вплив геометричних та режимних параметрів оборотної гідромашини на її енергетичні показники.

11. Резвая К. С. К расчету гидродинамических характеристик высоконапорной обратимой гидромашины в насосном режиме работы / Дранковський В. Е., Резвая К.С. // XV Международная научно-техническая конференция «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Харьков : ИПМаш, 2015.

Здобувачем доведено можливість використання блочно-ієрархічного підходу для розрахунку гідродинамічних та енергетичних параметрів оборотної гідромашини в насосному режимі роботи.

12. Резва К. С. Чисельне дослідження потоку рідини у підводі проточної частини оборотної гідромашини / Дранковський В. Е., Резва К. С. // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ : НТУУ «КП», 2016. – С. 152-153.

Здобувачем застосовано методіку чисельного дослідження потоку рідини в спіральній камері зі статором за допомогою програмного комплексу CFD для визначення втрат в розглянутих елементах.

13. Резва К. С. Визначення характеристик трьохмірного потоку рідини в елементах проточної частини оборотних гідромашин / Дранковський В. Е., Крупа Є. С., Резва К. С. // Тези доповідей 24-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Ч. 1. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – С. 252.

Здобувачем визначено основні характеристики в елементах підводу оборотної гідромашини в турбінному режимі роботи.

14. Резва К. С. Выбор модели турбулентности при расчете потерь энергии в элементах проточной части гидромашины с использованием программного комплекса CFD / Дранковський В.Е., Резва К.С., Дорошенко А. В. // Тези доповідей

25-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 290.

Здобувачем обґрунтовано доцільність використання k-ε моделі турбулентності при дослідженні робочого процесу високонапірних оборотних гідромашин.

15. Резвая К. С. Моделирование гидродинамических характеристик обратимых гидромашин на основе осредненных параметров / Дранковський В. Э., Резвая К. С., Тыньянова И. И., Ковшов Д. Н. // Тези доповідей 25-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 256.

Здобувачем доведено доцільність використання методу осереднених параметрів для визначення кінематичних і енергетичних параметрів на початкових етапах проектування проточної частини.

16. Резва К. С. Прогнозування енергетичних характеристик оборотних гідравлічних машинах в експлуатаційних режимах роботи / К. С. Резва, В. Е. Дранковський, А. О. Матвєєв // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – С. 139.

Здобувачем описано процес прогнозування енергетичних характеристик оборотних гідромашин.

17. Резва К. С. Підходи до чисельного дослідження гідродинамічних параметрів оборотних гідравлічних машин / Дранковський В. Е., Резва К. С. // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: Секція «Гідравлічні і пневматичні машини, гідروпередачі». Черкаси: НТУУ «КПІ», 2017. – С. 146-147

Здобувачем проаналізовано методи моделювання гідродинамічних параметрів оборотних гідравлічних машин на базі різних моделей розрахунку течії рідини в елементах проточної частини.

18. Резвая К. С. Численное исследование гидродинамических характеристик проточной части обратимой гидромашини / Дранковський В. Е., Тыньянова И. И., Резвая К.С. // XVI Международная научно-техническая конференция «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Харьков : ИПМаш, 2017.

Здобувачем проведено аналіз результатів дослідження гідродинамічних характеристик проточної частини оборотної гідромашини.

19. Kseniya Rezvaya, Evgeniy Krupa, Aleksandr Shudryk, Viktor Drankovski, Vadym Makarov. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kharkov, 2018, pp. 205-209

Здобувачем виконано аналіз розрахунків гідравлічних втрат в елементах проточних частин гідромашин.

20. Резва К. С. Баланс енергії високонапірних оборотних гідромашин у насосному режимі роботи / Дранковський В. Е., Резва К. С., Нікітін В. В. // Тези доповідей 26-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Ч. 1. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 93.

Здобувачем виконано дослідження робочого процесу високонапірної оборотної гідромашини в насосному режимі роботи. Зроблено порівняння отриманих результатів з експериментальними даними.

АНОТАЦІЇ

Резва К. С. Удосконалення проточних частин високонапірних оборотних гідромашин на основі чисельного моделювання їх гідродинамічних характеристик. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини і гідропневмоагрегати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019 р.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-практичної задачі удосконалення проточних частин високонапірних оборотних гідромашин за рахунок розробки методів розрахунку та аналізу їх гідродинамічних характеристик.

На підставі розгляду тенденцій розвитку гідроенергетики України, з урахуванням ролі високонапірних оборотних гідромашин в об'єднаній енергетичній системі, відмічено актуальність проектування нових проточних частин. Визначено переваги та недоліки існуючих методів дослідження гідродинамічних процесів у проточних частинах оборотних гідромашин.

Наведені результати розрахунку гідродинамічних характеристик елементів проточної частини на основі методу осереднених безрозмірних параметрів для оборотних гідромашин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100. Застосована математична модель робочого процесу гідромашини на основі блочно-ієрархічного підходу для проведення дослідження балансу енергії. Визначено вплив геометричних параметрів елементів проточної частини на показники роботи.

Проведено чисельне дослідження просторової течії рідини в проточній частині високонапірних оборотних гідромашин за допомогою CFD, що дозволило визначити та візуалізувати картину течії. Складено баланси енергії гідромашин ОРО200-В-100 та ОРО500-В-100. Відмічено, що розподіл втрат по елементам проточної частини нерівномірний: для ОРО200-В-100 найбільшу частину втрат складають втрати в робочому колесі (близько 56 %), для ОРО500-В-100 – втрати у підводі (близько 62 %). Описано основні положення визначення оптимального режиму роботи оборотної гідромашини.

Запропоновано та досліджено модифікований підвід для тихохідної оборотної гідромашини ОРО500-В-100, щоб підвищити її енергетичні показники: краще узгоджені елементи ПЧ та гідравлічний ККД збільшився на 2 %.

Ключові слова: оборотна гідромашина, насосний режим, турбінний режим, баланс енергії, втрати енергії, математична модель, осереднені безрозмірні параметри, чисельне дослідження, просторова течія.

Резвая К. С. Совершенствование проточной части высоконапорных обратимых гидромашин на основе численного моделирования их гидродинамических характеристик. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. –

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2019 г.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи усовершенствования проточных частей высоконапорных обратимых гидромашин за счет разработки методов расчета и анализа их гидродинамических характеристик.

На основании рассмотрения тенденций развития гидроэнергетики Украины, с учетом роли высоконапорных обратимых гидромашин в объединенной энергетической системе, отмечено актуальность проектирование новых проточных частей. Определены преимущества и недостатки существующих методов исследования гидродинамических процессов в проточных частях обратимых гидромашин.

Приведенные результаты расчета гидродинамических характеристик элементов проточной части на основе метода осредненных безразмерных параметров для обратимых гидромашин ОРО200-В-100 и ОРО500-В-100. Применена математическая модель рабочего процесса гидромашин на основе блочно-иерархического подхода для проведения исследования баланса энергии. Определено влияние геометрических параметров элементов проточной части на показатели работы.

Проведено численное исследование пространственного течения жидкости в проточной части высоконапорных обратимых гидромашин с помощью CFD, что позволило определить и визуализировать картину течения. Составлен балансы энергии гидромашин ОРО200-В-100 и ОРО500-В-100. Отмечено, что распределение потерь по элементам проточной части неравномерен: для ОРО200-В-100 наибольшую часть потерь составляют потери в рабочем колесе (около 56 %), для ОРО500-В-100 – потери в подводе (около 62 %). Описаны основные положения определения оптимального режима работы оборотной гидромашин.

Предложено и исследовано модифицированный подвод для тихоходной оборотной гидромашин ОРО500-В-100, чтобы повысить ее энергетические показатели: лучше согласованы элементы ПЧ и гидравлический КПД увеличился на 2 %.

Ключевые слова: обратимая гидромашин, насосный режим, турбинный режим, баланс энергии, потери энергии, математическая модель, осредненные безразмерные параметры, численное исследование, пространственное течение.

Rezvaya K. S. Improvement of the water passages of the high-pressure reversible hydraulic machines based on numerical modeling of their hydrodynamic characteristics. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.05.17 – Hydraulic machines and hydropneumatic units. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2019.

The thesis is devoted to the solution of the scientific and practical problem of improvement of the water passages of the high-pressure reversible hydraulic due to calculation and analysis their hydrodynamic characteristics.

Based on the review of the trends in the development of hydropower engineering in Ukraine and given the role of high-pressure reversible hydraulic machines in the United Power System, it was noted that the designing a new flow parts is topical task.

Advantages and disadvantages of the existing methods for research hydrodynamic processes in water passages of reversible hydraulic machines were identified after their analysis.

The results of the calculation of the hydrodynamic characteristics of the elements of the water passages based on the method of averaged dimensionless parameters using the example of reversible hydraulic machines OPO200-B-100 and OPO500-B-100 were demonstrated. The mathematical model of the hydraulic machine working process based on a block-hierarchical approach was used to study the energy balance in the turbine and pump modes of hydraulic machines.

The influence of the geometrical parameters of the elements of the water passage on the performance was determined: how the angle of flow in the spiral casing ($\tilde{\alpha}_{\text{CH}}$), the height of the wicket gate (b_0/D) and the shape of the wicket gate profile influence the value of the coefficient resistance in the wicket gate.

A numerical study of the three-dimensional flow of fluid in the water passage of high-pressure reversible hydraulic machines was carried out using the CFD software. This program allows determining the character of the flow and presenting the fields of distribution of velocity components, pressure and streamlines.

The balances of energy were compiled: for the OPO200-B-100 in the turbine and pump operation modes, for the OPO500-B-100 in the turbine operation mode. It is noted that the distribution of losses on the elements of the water passage is not uniform: for the OPO200-B-100, the greatest part of the total losses are losses in the runner (about 56%), for OPO500-B-100 - losses in the inlet (about 62%).

The main points for determining the optimal operating mode of the reversible hydraulic machine are described.

The modified inlet for low-speed high-pressure hydraulic machine OPO500-B-100 was proposed and investigated to increase energy performance of hydraulic machine. The spiral casing was expanded, the number of stay vane blades and wicket gate blades were reduced to 16. As a result of the calculations of the modified inlet, the obtained results showed that the second variant made it possible to better align the elements of the water passage and the hydraulic efficiency increased by 2 %.

Keywords: reversible hydraulic machine, pumping mode, turbine mode, energy balance, energy losses, mathematical model, averaged dimensionless parameters, numerical research, three-dimensional flow.

