

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Миронов Костянтин Анатолійович

УДК 621.224

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН РАДІАЛЬНО-ОСЬОВИХ
ГІДРОТУРБІН НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гідравлічних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Количев Владислав Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри гідравлічних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гнесін Віталій Ісайович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, м.
Харків, завідувач відділу нестационарної газодинаміки та ае-
ропружності

кандидат технічних наук, доцент
Неня Віктор Григорович,
Сумський державний університет, м. Суми,
доцент кафедри інформатики

Захист відбудеться 4 червня 2009 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 30 » квітня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення ефективності гідротурбінного обладнання ГЕС представляє важливу науково-технічну проблему, рішення якої приводить до необхідності вдосконалення сучасних методів розрахунку й аналізу робочого процесу гідротурбіни (ГТ).

Загальноприйнятий підхід для вдосконалення проточної частини (ПЧ) ГТ полягає у формуванні її геометрії шляхом внесення змін до базового варіанту, отриманого в результаті приблизного рішення оберненої задачі, або, в прийнятий як аналог. Порівняння проектних варіантів виробляється на основі розрахункової оцінки їх кінематичних і енергетичних характеристик. Пошук оптимального варіанту надзвичайно ускладнює процес удосконалення ПЧ, оскільки такий підхід вимагає перебору значної кількості геометричних параметрів і їх комбінацій. Трудність рішення поставленої задачі обумовлена як складною просторовою геометрією лопатевої системи робочого колеса (РК), так і різною мірою впливу робочих органів на формування енергетичних характеристик.

Відсутність методики узгодження елементів ПЧ в процесі її формування на основі рішення прямої задачі істотно ускладнює процес удосконалення ПЧ, збільшує об'єм науково-дослідних і проектних робіт. Тому розробка адекватної математичної моделі (ММ) для розрахунку і аналізу енергетичних характеристик і її застосування для узгодження елементів ПЧ при проектуванні є вельми актуальним завданням, рішення якого і присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі «Гідравлічні машини» НТУ «ХПІ». Здобувач був виконавцем держбюджетних тем МОН України: «Математичне моделювання просторових потоків і робочого процесу гідротурбін» (ДР № 0100U001698), «Визначення характерних закономірностей робочого процесу у високонапірних гідротурбінах з широким діапазоном експлуатаційних напорів та витрат» (ДР № 0103U001504), «Розробка комплексу математичних моделей проточних частин гідротурбін та визначення характерних особливостей робочого процесу» (ДР № 0106U001481) й госпдоговірній НДР «Development of Space and Blading of High-Head Francis Turbine Fr 80 (H=500 m)» між заводом важкого машинобудування BHEL (м. Бопал, Індія) і НТУ «ХПІ».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення проточних частин радіально-осьових гідротурбін на основі математичного моделювання їх енергетичних характеристик.

Для досягнення поставленої мети були вирішені задачі:

- удосконалити методику дослідження робочого процесу й застосувати її для аналізу формування енергетичних характеристик радіально-осьових гідротурбін у широкому діапазоні зміни швидкохідності;
- встановити загальну структуру функціональної залежності гідравлічних втрат від гідродинамічних параметрів просторових решіток робочого колеса й режимних параметрів гідротурбіни;
- розробити узагальнену математичну модель робочого процесу, що адекватно відображає залежності вихідних параметрів (ККД, потужність, окремих видів втрат енергії) від геометричних і режимних параметрів проточної частини в широкому діапазоні зміни швидкохідності;
- встановити закономірності формування параметрів оптимального режиму радіально-осьових гідротурбін у зв'язку зі зміною швидкохідності;
- розробити методику чисельного аналізу впливу геометричних і режимних параметрів на енергетичні характеристики радіально-осьових гідротурбін;

Об'єкт дослідження – робочий процес радіально-осьових гідротурбін в діапазоні основних експлуатаційних режимів.

Предмет дослідження – енергетичні характеристики радіально-осьових гідротурбін.

Методи дослідження. Теоретичні положення роботи базуються на фундаментальних положеннях механіки рідини та газу, методах математичного та фізичного моделювання робочого процесу гідротурбін. Для побудови ММ робочого процесу, аналізу формування енергетичних характеристик, систематизації і узагальнення даних фізичного і чисельного експерименту використовувалися методи теорії розмірності.

Наукова новизна отриманих результатів:

- дістав подальший розвиток метод аналізу енергетичних характеристик радіально-осьових гідротурбін, що дозволяє встановити в безрозмірній формі структуру функціональної залежності гідравлічних втрат у робочому колесі від гідродинамічних параметрів решіток і узагальнених режимних параметрів;
- вперше розроблена узагальнена математична модель робочого процесу радіально-осьових гідротурбін, що відображає загальні закономірності робочого процесу в широкому діапазоні зміни швидкохідності і є основою для удосконалення проточної частини й застосування методів оптимізації;
- обґрунтовано новий підхід для систематизації й узагальнення даних фізичного й чисельного експерименту про вплив геометричних параметрів проточної частини на енергетичні показники радіально-осьових гідротурбін;
- дістала подальший розвиток теорія робочого процесу в напрямку дослідження закономірностей кінематичних і енергетичних характеристик радіально-осьових гідротурбін у широкому діапазоні зміни швидкохідності.

Практичне значення отриманих результатів в дисертаційній роботі визначається доцільністю використання розроблених моделей, алгоритмів і їх програмної реалізації, результатів розрахунків для прогнозування енергетичних показників, багатоваріантного аналізу впливу геометричних параметрів на окремі види гідравлічних втрат і на основні параметри ГТ, проведення оптимізаційних розрахунків при виборі гідродинамічних параметрів в процесі проектування ПЧ радіально-осьових (РО) ГТ.

Створено комплекс прикладних програм (КПП) для проектування і розрахунку робочих коліс (РК), а також програма розрахунку прогнозуної універсальної характеристики ПЧ ГТ. Розроблені програми можуть бути використані як при проектуванні гідротурбінного устаткування для тих ГЕС, що будуються так і при модернізації тих, що існують. Їх застосування дозволяє скоротити терміни проектування, зменшити об'єм науково-дослідних і проектних робіт, поліпшити якість розробок ПЧ.

Результати дисертаційної роботи були використані в НДР між НТУ «ХПІ» і заводом важкого машинобудування ВНЕЛ (м. Бопал, Індія) при проектуванні ГЕС Каменг.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед них: розробка методики аналізу універсальних характеристик ГТ; розробка узагальненої ММ ПЧ ГТ, яка дозволяє на основі аналізу гідравлічних втрат оптимізувати геометричні параметри ПЧ; розробка алгоритмів, написання і відладка основних розрахункових програм, проведення тестових розрахунків; проектування лопатевих систем РК радіально-осьових ГТ на задані режимні параметри і дослідження їх розрахункових характеристик; проведення чисельного дослідження впливу геометричних параметрів РК радіально-осьових ГТ на енергетичні показники.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції “Вдосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання” (м. Зміїв, 2000 р., 2006 р.); щорічних науково-практичних конференціях X-XVI «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2002-2008 р.р.)

Публікації. За результатами проведених в дисертаційній роботі досліджень опубліковано 9 робіт у фахових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 5 додатків, списку використаних джерел. Повний об'єм дисертації складає 174 сторінки, серед них: 42 рисунки по тексту, 4 рисунки на 4 окремих сторінках; 6 таблиць по тексту, 5 додатків на 7 сторінках, список використаних джерел із 154 найменувань на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність розглянутої теми, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено основні положення, що мають наукову новизну і практичну цінність.

У **першому розділі** виконано огляд сучасного стану питання розвитку методів вирішення прямої і оберненої задачі теорії робочого процесу і їх застосування при проектуванні ПЧ.

Наголошується, що рішення оберненої задачі в загальній постановці, що передбачає визначення геометричних параметрів ПЧ, які забезпечують задані параметри оптимального режиму, представляє значні труднощі. У практиці проектування, як правило, обмежуються окремим випадком рішення оберненої задачі – проектуванням лопатевої системи на задані параметри оптимального режиму $n'_{I\text{onm}}$ і $Q'_{I\text{onm}}$ при вибраних органах підводу та відводу (Топаж Г.І., Вікторов Г.В., Моргунов Г.М., Провад Є.Б., Borges J.E., Tomas L. і ін.).

Застосовувані на практиці методи рішення оберненої задачі містять істотні допущення про характер течії в ПЧ, а вибір вихідних геометричних параметрів РК здійснюється без належного узгодження з іншими елементами ПЧ. Вказані допущення часто приводять до розбіжності розрахункового режиму з оптимальним.

У зв'язку з цим особливо важливого значення набуває метод рішення прямої задачі теорії робочого процесу – розрахунок кінематичних і енергетичних характеристик при фіксованій геометрії ПЧ. За допомогою цього методу вирішується широкий круг питань, пов'язаних з удосконаленням ПЧ (збільшенням одиничної потужності ГТ, швидкохідності, підвищенням рівня ККД на оптимальному режимі, збільшенням пологості кривої ККД при відході від оптимального режиму і ін.).

Рішення прямої задачі теорії робочого процесу передбачає моделювання кінематичних характеристик потоку і енергетичних характеристик ГТ. У роботі приведений аналіз різних моделей течії в ПЧ ГТ, розглянуті можливості і доцільність їх застосування для удосконалення ПЧ.

В даний час для розрахунку параметрів потоку використовуються квазітривимірні, тривимірні моделі ідеальної рідини (Раухман Б.С., Топаж Г.І., Моргунов Г.М., Колтон А.Ю., Жарковський О.А., Косторной С.Д., Степанов Г.Ю.) і тривимірні моделі течії в'язкої рідини (Чорний С.Г., Лапін В.Н., Скороспелов В.А., Wilcox D.C., Göde E., Ruprecht A., Sallaberger M., Brekke H. і ін.). У ряді робіт використовується блоково-ієрархічний підхід (Жарковський О.А., Количев В.О., Пильов І.М. і ін.), що передбачає використання моделей різного ієрархічного рівня на різних етапах проектування ПЧ.

Математичне моделювання енергетичних характеристик включає вирішення ряду задач: розрахунок і аналіз формування енергетичних характеристик; чисельний аналіз впливу геометричних і режимних параметрів як на окремі види втрат, так і на енергетичні показники в цілому; чисельне дослідження впливу геометричних параметрів на параметри оптимального режиму і аналіз умов його формування. Вирішенню вказаних питань присвячено значне число робіт: Колтон А.Ю., Етінберг І.Е., Гутовський Е.В., Топаж Г.І., Количев В.О. і ін. Результати чисельного і фізичного експериментів про вплив геометричних параметрів на енергетичні показники широко використовуються в загальноприйнятому підході до удосконалення ПЧ, що базується на внесенні змін в геометрію і подальшій оцінці цих змін.

Недоліком загальноприйнятого підходу є відсутність методики визначення тих геометричних параметрів і їх комбінацій, які забезпечують досягнення необхідних показників. Також відсутній аналіз формування енергетичних характеристик РО ГТ у зв'язку зі зміною геометрії елементів ПЧ в широкому діапазоні зміни швидкохідності.

Інший підхід в постановці і вирішенні прямої і оберненої задач спирається на теорію робочого процесу, що встановлює загальні закономірності течії і силової взаємодії потоку з РК (Войташевський Д.А., Руднев С.С., Вікторов Г.В.). У ряді робіт (Никітін І.М., Федулов Ю.І., Клімов А.І., Количев В.О. і ін.) такий підхід був використаний при вирішенні окремих питань, що виникають при проектуванні ПЧ ГТ.

Розробка ММ базується на загальних закономірностях робочого процесу і її застосування є вельми актуальним. ММ може бути ефективно використана як для чисельного пошуку оптимальних варіантів ПЧ шляхом багатоваріантного чисельного аналізу, так і для застосування оптимізаційних методів при рішенні оберненої задачі.

На підставі проведеного огляду сформульовані цілі і задачі дослідження.

У **другому розділі** приведено аналіз формування енергетичних характеристик ГТ в широкому діапазоні зміни швидкохідності. Методика такого аналізу базується на теорії робочого про-

цесу, що встановлює загальні закономірності обтікання лопатевих систем і їх силової взаємодії з потоком. Для опису вказаних закономірностей використовуються безрозмірні комплекси, структура яких витикає з теорії розмірності (Войташевський Д.А., Руднев С.С.).

Показано, що залежно від характеру поставлених задач доцільно використання двох варіантів безрозмірних комплексів.

Представлення загальних закономірностей робочого процесу за допомогою безрозмірних параметрів. У першому варіанті для опису кінематики потоку використовувалися безрозмірні комплекси (як величини з незалежною розмірністю прийняті ρ, D і Q).

Основне кінематичне рівняння встановлює зв'язок безрозмірних кінематичних комплексів (коефіцієнтів усереднених циркуляцій) у вхідному і вихідному перерізах РК з постійною частотою обертання

$$\frac{\bar{\Gamma}_2 D}{Q} = k \frac{\bar{\Gamma}_1 D}{Q} - (1-k) \bar{\mu} + (1-k) \frac{\pi}{2} \Lambda^2 k_Q, \quad (1)$$

Рівняння (1) не накладає обмежень на просторовість і в'язкість (Вікторов Г.В., Количев В.О.), тому воно справедливе для реального обтікання просторових решіток РК.

Загальні закономірності силової взаємодії виражаються залежностями безрозмірних коефіцієнтів гідравлічного моменту, потужності і теоретичного напору:

$$k_{MG} = \frac{M_{\Gamma} D}{\rho Q_{\kappa}^2} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \Lambda^2 k_Q \right), \quad k_{NG} = \frac{N_{\Gamma} D^4}{\rho Q_{\kappa}^3} = k_{HT} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \Lambda^2 k_Q \right) k_Q$$

$$k_{HT} = \frac{g H_T D^4}{Q_{\kappa}^2} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu - \frac{\pi}{2} \Lambda^2 k_Q \right) k_Q. \quad (2)$$

У другому варіанті безрозмірних комплексів, як величини з незалежною розмірністю прийняті ρ, D, ω .

При використанні другого варіанту безрозмірних комплексів рівняння (1) буде мати вигляд

Використання другого варіанту безрозмірних комплексів приводить до представлення безрозмірних теоретичних характеристик у такому вигляді:

$$k_{MG}^* = \frac{M_{\Gamma}}{\rho \omega^2 D^5} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)}{4} \Lambda^2 k_Q^*, \quad k_{HT}^* = \frac{g H_T}{\omega^2 D^2} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^* - \frac{(1-k)}{4} \Lambda^2,$$

$$k_{NG}^* = \frac{N_{\Gamma}}{\rho \omega^3 D^5} = \frac{(1-k)}{2\pi} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} + \mu \right) k_Q^{*2} - \frac{(1-k)}{4} \Lambda^2 k_Q^*. \quad (3)$$

Залежності (2, 3) виражають загальні закономірності силової взаємодії потоку з РК. Ці залежності є теоретичними характеристиками ГТ. Досвід показує справедливість рівнянь теоретичних характеристик ГТ різного типу в досить широкому діапазоні робочих режимів (рис. 1).

У відповідності з (3) дослідні точки, що належать одному і тому ж відкриттю розташовуються на одній і тій же прямій, побудованій в координатах.

Одним з достоїнств вказаної системи безрозмірних комплексів є можливість їх використання, як у турбінному, так і в насосному режимах. Це є актуальним як для зображення, так і для аналізу енергетичних характеристик оборотних гідромашин. На рис. 2 представлені універсальні характеристики ГТ різної швидкохідності в координатах.

Дослідні графіки (рис. 1) показують закономірну зміну безрозмірних кінематичних і напірних теоретичних характеристик у зв'язку зі зміною швидкохідності. У всьому діапазоні зміни швидкохідності зберігається лінійний характер цих залежностей (3); параметри цих залежностей (гідродинамічні параметри просторових решіток μ і λ) закономірно змінюються у зв'язку зі зміною швидкохідності.

Аналіз формування коефіцієнта втрат. Гідравлічний ККД в зоні основних експлуатаційних режимів визначається двома функціональними залежностями: коефіцієнтом теоретичного напору і коефіцієнтом втрат при цьому. Коефіцієнт k_{HT}^* є відомою функцією гідродинамічних параметрів РК і узагальнених кінематичних параметрів i . Питання про структуру залежності і ха-

рактик її зміни у зв'язку зі зміною швидкохідності досліджено недостатньо. Визначення структури залежності є однією з основних задач теорії робочого процесу.

У роботі значне місце приділене аналізу впливу на формування енергетичних характеристик. Графіки (рис. 3) ізолій ККД і ізолій коефіцієнтів втрат, для РО ГТ різної швидкохідності, показують взаємозв'язок η і μ . Порівняльний аналіз η і μ показує істотний вплив коефіцієнта втрат на формування залежності в діапазоні основних експлуатаційних режимів.

У дисертаційній роботі приведений порівняльний аналіз ізолій при (рис. 4, 5). Аналіз взаємозв'язку η і μ в досить широкому діапазоні швидкохідності говорить про те, що коефіцієнт втрат значною мірою впливає як на величину, так і на характер зміни ККД. У зв'язку з цим виникає необхідність аналізу формування коефіцієнта втрат. У задачі аналізу входило виділення складових коефіцієнта втрат, які найістотніше впливають на формування ККД. Можливість збільшення ККД, в першу чергу пов'язана з мінімізацією втрат, що складають повний коефіцієнт втрат. Особливий інтерес представляє зменшення цих втрат на оптимальному режимі.

У роботі Войташевського Д.А. запропонована методика розділення коефіцієнтів втрат у ПЧ осової ГТ, заснована на представленні коефіцієнта втрат в РК і відсмоктуючій трубці залежно від безрозмірних кінематичних комплексів μ і μ_m . У даній роботі обґрунтовано представлення коефіцієнта втрат на ділянці ПЧ, включаючи РК і відсмоктуючу трубу у вигляді суми двох функцій, кожна з яких залежить лише від одного аргумента: μ , де безрозмірні комплекси μ і μ_m визначають відповідно напрям відносного потоку перед РК і напрям абсолютного потоку за РК на заданому режимі роботи.

Логічно передбачити, що функції η та μ виражають собою прийняті в турбомашинях категорії втрат. Функція η – втрати обумовлені відривом потоку на вхідній кромці РК, що виникають на нерозрахункових режимах (ударні втрати), функція μ – це індуктивні втрати (циркуляційні втрати і втрати від осового вихору).

Розріз сумарного коефіцієнта втрат μ при μ_m дає структуру індуктивних і ударних втрат відповідно.

Аналіз дослідних даних, отриманих за результатами даної методики показав, що режим «тах» ККД лежить у безпосередній близькості до режиму мінімуму вихрових втрат за РК.

Мінімальне значення коефіцієнта μ має місце при напрямі відносного потоку. Гідродинамічний параметр μ_m не залежить від режиму роботи і може розглядатися як гідродинамічний параметр решітки РК, визначений по геометрії вхідної частини лопати.

Режим, при якому досягається μ відрізняється від режиму тах ККД. Параметр визначає напрям відносного потоку, при якому відсутні втрати, обумовлені відривом потоку – ударні втрати. Таким чином, напрям відносного потоку, при якому досягається максимальний гідравлічний ККД відрізняється від напрямку безударного обтікання.

Формування оптимального режиму. У роботі приведена методика визначення кінематичних характеристик потоку в розрахункових перерізах ПЧ, що базується на кінематичному описі потоку і даних універсальних характеристик. За допомогою цієї методики отримані дані про кінематичні характеристики потоку на оптимальному режимі для різних РО ГТ з високими енергетичними показниками в широкому діапазоні зміни швидкохідності.

Показані узагальнені дослідні дані про кінематичні характеристики потоку в характерних перерізах ПЧ на оптимальному режимі. Приведені дані дозволяють судити про умови обтікання напрямного апарата (НА) і РК на оптимальному режимі і про узгодження елементів ПЧ у процесі її проектування.

У **третьому розділі** ставиться і вирішується задача побудови ММ, що описує робочий процес РО ГТ у широкому діапазоні зміни швидкохідності. Показано її застосування для вирішення широкого кола питань, що виникають при розробці та удосконаленні ПЧ: прогнозування енергетичних характеристик; проведення багатоваріантного чисельного аналізу впливу геометричних параметрів на енергетичні показники; узгодження елементів ПЧ і ін.

Побудова ММ робочого процесу передбачає попереднє визначення моделі втрат у ПЧ – функціональної залежності, що відображає в безрозмірній формі зв'язок втрат енергії у ПЧ з геометричними, кінематичними і режимними параметрами.

Для визначення моделі втрат були використані загальні закономірності зміни коефіцієнтів втрат енергії у зв'язку зі зміною швидкохидності, викладені вище.

Узагальнена залежність коефіцієнта гідравлічних втрат у ПЧ радіально-осьової ГТ представлена у наступному вигляді

$$k_h = k_{ck+cm} + k_{HA} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} \right) + a_1 \left(\frac{\bar{\Gamma}_{cn} D}{Q} - \mu_{HA} \right)^2 + a_2 \left(\frac{\bar{\Gamma}_{cn} D}{Q} - \frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q} \right)^2 +$$

$$+ k_{PK+omc} \left(\mu, \mu_m \right) + \frac{\lambda \left(\frac{\pi}{2} k_{r1}^2 k_Q - \frac{ctg \tilde{\alpha}_0}{S_1} - \mu_m \right)^2}{2\pi^2 k_{r1}^2} + \frac{1}{2\pi^2 k_{r2}^2} \left(\frac{\pi}{2} \lambda^2 k_Q - \mu \right)^2, \quad (4)$$

Параметри a_1 і a_2 визначаються геометрією лопатки НА. Третій і четвертий члени в правій частині залежності (4) враховують відповідно втрати із-за неспівпадання напрямку потоку перед НА з гідродинамічним параметром решітки μ_{HA} і втрати, обумовлені вторинними течіями. Останні два члени виражають залежності коефіцієнтів втрат у просторових решітках РК, обумовлених неспівпаданням напрямку відносного потоку з напрямком «безударного натікання» і обумовлених наявністю закрутки за РК.

Рівняння ММ робочого процесу було отримано шляхом підстановки розгорнутих виразів і в основне рівняння ГТ (5) і у рівняння балансу гідравлічної енергії (6), представлених в безрозмірній формі:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{k_{HT} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L'_{PK} \right)}{g} Q_I'^2, \quad (5)$$

$$Q_I' = \sqrt{\frac{g}{k_{HT} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L'_{PK} \right) + k_h \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L' \right)}}, \quad (6)$$

$$N_I' = \rho g Q_I' \eta = \rho k_{HT} \left(\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}, k_Q, L'_{PK} \right) Q_I'^3. \quad (7)$$

Зважаючи на громіздкість виразів і розгорнуті залежності ММ не наводяться, а використовується їх структурне зображення.

При використанні другого варіанту безрозмірних комплексів залежності мають наступний вигляд:

Використання двох наборів безрозмірних комплексів для опису ММ виявляється доцільним для зображення і аналізу енергетичних характеристик ГТ.

Система залежності (5) - (7) з врахуванням розгорнутих виразів коефіцієнта теоретичного напору k_{HT} і коефіцієнта втрат k_h відображає взаємозв'язок геометричних, режимних і енергетичних параметрів. При заданих значеннях геометричних параметрів ПЧ рівняння ММ дозволяють розрахувати величини ККД, потужності, окремих видів втрат енергії у заданому діапазоні універсальної характеристики. При фіксованому значенні η , з (6) знаходиться зв'язок параметрів Q_I' , тобто рівняння лінії відкриття. Залежності Q_I' знаходиться виключенням Q_I' з рівнянь (5) і (6).

При побудові ММ використовувалися загальні закономірності робочого процесу РО ГТ. Це дозволяє її використовувати у широкому діапазоні зміни швидкохидності.

Своєрідність ММ полягає у використанні разом з геометричними параметрами ПЧ гідродинамічних параметрів просторових решіток РК і НА k_{r1} , μ_{HA} , k_{r2} , k , μ_m , λ , μ . Структура моделі залишається незмінною, а параметри моделі істотно міняються при переході від однієї швидкохидності до іншої.

У роботі приведені методи визначення гідродинамічних параметрів просторових решіток РК на основі двовимірних і квазітривимірних моделей течії. Приведені порівняльні дані гідроди-

намічних параметрів, отриманих за допомогою двовимірних моделей ідеальної рідини і моделі тривимірного в'язкого потоку.

Діапазон допустимого використання ММ визначається допущенням про незалежність гідродинамічних параметрів РК від режимних параметрів ГТ. Досвід показує незалежність цих параметрів в діапазоні основних експлуатаційних режимах для РО ГТ різній швидкохідності.

Показана можливість застосування розробленої ММ для вирішення ряду задач, пов'язаних з проектуванням і удосконаленням ПЧ: прогнозування енергетичних характеристик; аналіз впливу геометричних параметрів ПЧ на окремі види втрат і на енергетичні показники в цілому; узгодження елементів ПЧ при виборі її основних геометричних параметрів і ін.

При проектуванні ПЧ вибір вихідних геометричних параметрів РК здійснюється без належного узгодження з іншими елементами ПЧ. Це як правило приводить до неспівпадання розрахункового і заданого оптимального режиму. Доведення ПЧ до необхідних показників здійснюється шляхом внесення змін у геометрію і проведенню подальших багатоваріантних розрахунків. Складність полягає у пошуку варіантів ПЧ, які оптимізують показники ГТ. Запропонований підхід для забезпечення кращого узгодження параметрів розрахункового режиму з оптимальним ґрунтується на використанні рівнянь оптимального режиму, що зв'язують параметри оптимального режиму з гідродинамічними параметрами РК. Ці рівняння отримані на основі розробленого математичного опису робочого процесу.

У роботі запропонований підхід до формування ПЧ, який забезпечує задані параметри оптимального режиму. Формування вихідної частини лопаті повинне забезпечувати необхідні значення гідродинамічних параметрів λ і μ і, отже, відповідно до рівнянь оптимального режиму. При формуванні вхідної частини лопаті необхідно враховувати її узгодження з елементами підвідної частини ГТ. Таке узгодження дуже важливе для високонапірних ГТ, де роль підвідної частини вельми велика, при формуванні енергетичних характеристик. Це досягається шляхом чисельного аналізу впливу геометричних параметрів вхідної частини лопаті РК і підвідної частини.

З розглянутих варіантів вибирається той, який щонайкраще відповідає вимогам технічного завдання. Узгодження елементів ПЧ досягається при певному наборі її гідродинамічних параметрів, визначених у результаті проведення чисельного експерименту. Ці параметри виражають інтегральні умови, які повинні виконуватися при формуванні геометрії ПЧ на задані параметри оптимального режиму. У роботі приведені інтегральні вирази для гідродинамічних параметрів, отримані на основі різних моделей течії.

На рис. 6 зображені дослідні графіки зміни гідродинамічних параметрів РК з високими енергетичними показниками у діапазоні напорів $H = 45 \div 500$ м.

Використання узагальненої ММ для вирішення оберненої задачі теорії робочого процесу. Задача проектування ПЧ на першому етапі може бути сформульована як задача знаходження гідродинамічних параметрів, що перетворюють цільову функцію – $\eta_{ГТ}$ – в максимум, при заданих значеннях розрахункового режиму і функціональному обмеженні, яке виражає умову енергетичного балансу.

Виходячи з рівняння $\eta_{ГТ}$ у вигляді: використовуючи зв'язок режимних і гідродинамічних параметрів ПЧ у вигляді функціонального обмеження, що витікає з умови енергетичного балансу ГТ задачу зводимо до пошуку умовного екстремуму функції декількох змінних: при заданому значенні параметрів розрахункового режиму і наявності нелінійного обмеження у вигляді рівняння (8). Поставлена задача вирішується методами нелінійного програмування (метод проекції градієнта, метод штрафних функцій і ін.).

Заздалегідь були вибрані меридіональні контури ПЧ в області НА і РК й задані положення їх вхідних і вихідних кромок. Управляючими параметрами були: .

Обмеження по управляючих параметрах отримані в результаті дослідження впливу окремих елементів ПЧ на прогнозну характеристику. Для вирішення оптимізаційної задачі був застосований комплексний метод Бокса. В результаті рішення задачі оптимізації знаходиться оптимальний набір гідродинамічних параметрів ПЧ.

У табл. 1 приведені оптимальні варіанти гідродинамічних параметрів ПЧ ГТ у широкому діапазоні швидкохідності, при яких досягається максимальний гідравлічний ККД, для заданих параметрів оптимального режиму.

Таблиця 1

Гідродинамічні параметри ПЧ ГТ

Тип ГТ	Гідродинамічні параметри і значення ККД					
	$\frac{\bar{\Gamma}_{cn} D}{Q}$	$\frac{\bar{\Gamma}_0 D}{Q}$	m_m	l	m	h_r
PO 500	25.89	38.37	5.29	0.501	13.53	0.949
PO 230	11.82	15.11	3.9	0.67	8.6	0.945
PO 45	4.84	5.14	2.6	0.631	5.29	0.943

Проектування елементів підвідної частини і профілювання лопатевої системи РК повинні забезпечити знайдені величини гідродинамічних параметрів.

У четвертому розділі приведено розроблений КПП, що дозволяє спроектувати РК радіально-осьової ГТ з високими енергетичними показниками і отримати прогнозну універсальну характеристику ГТ. КПП розроблено на основі запропонованої узагальненої ММ робочого процесу, яку описано вище. КПП має блокову структуру (рис. 7), що дозволяє змінити програми, які входять в його склад, на інші або додавати нові з урахуванням тієї обставини, що кожна програма формує файли вихідних даних для подальшої. При проведенні розрахунків КПП дає можливість оцінити вплив геометричних параметрів лопатевих систем на енергетичні показники ГТ і вибрати їх оптимальне поєднання.

На кафедрі гідромашин НТУ «ХПІ» проводилася НДР з заводом важкого машинобудування ВНЕЛ (м. Бопал, Індія). Кафедрою було отримано технічне завдання на проектування ПЧ ГЕС Каменг:

На умови ГЕС Каменг, з розрахунковими режимними параметрами $Q'_I = 150 \text{ л/с}$ і $n'_I = 60 \text{ об/хв}$, було спроектовано з використанням КПП РК PO 500-5Vm і отримана прогнозна універсальна характеристика ПЧ ГТ. Оптимум прогнозної характеристики спроектованого РК добре відповідає заданим параметрам оптимального режиму. Розрахункові енергетичні характеристики розробленого РК кращі, ніж у номенклатурного РК PO500/3502.

Співробітниками фірми ВНЕЛ був виконаний розрахунок тривимірної течії в ПЧ гідротурбіни PO 500-5Vm з використанням комерційного програмного комплексу CFD - CFX TASCflow. Чисельне моделювання течії в ПЧ гідротурбіни PO 500-5Vm проводилося для розрахункової області, що включає міжлопатевий канал, утворений колонами статора, лопатками НА, лопатями РК і відсмоктуючою трубою для моделі діаметром РК $D_I = 500 \text{ мм}$. Сітка в розрахунковій області налічує близько 1,5 млн. елементів. Було проведено порівняння розрахункових втрат у всій ПЧ і її окремих елементах в оптимальній розрахунковій точці.

У табл. 2. наведено порівняння результатів розрахунку оптимального режиму отриманих за допомогою КПП, CFD - CFX Taskflow та даних, отриманих з експерименту.

Таблиця 2

Результати розрахунку оптимального режиму

	PO 500-5Vm					
	α_0°	l	m	$Q'_I, \text{ л/с}$	$n'_I, \text{ об/хв}$	η
Розрахунок з використанням КПП	12.75	0.54	20.2	147	60.1	0.931*
Розрахунок CFD (CFX Taskflow)	14	0.529	21.8	148	61.35	0.9533**
Експеримент	14.5	0.54	19.72	155	62.6	0.9175

Примітка: * – з врахуванням дискових втрат

** – лише гідравлічний ККД (без врахування втрат в СК)

На рис. 8 приведено порівняння розрахункових і експериментальної універсальних характеристик ПЧ ГТ з РК РО 500-5Вт.

На гідротурбінному стенді заводу важкого машинобудування ВНЕЛ (м. Бопал, Індія) були проведені комплексні дослідження моделі розробленої ГТ з РК РО 500-5Вт. Розрахункові характеристики РК РО 500-5Вт добре узгоджуються з експериментальними даними (рис. 8), що дозволяє обґрунтовано застосовувати запропоновану узагальнену ММ і розроблений на її основі КПП для проектування РК РО ГТ.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішення науково-практичної задачі удосконалення ПЧ радіально-осьових ГТ на основі математичного моделювання їх енергетичних характеристик. Основні результати та висновки:

1. Проведений аналіз літературних джерел показав, що не досить досліджено питання про закономірності формування енергетичних характеристик у зв'язку зі зміною швидкохідності. Знання цих закономірностей необхідне для проектування і удосконалення ПЧ.

2. Показана доцільність застосування безрозмірних комплексів, структура яких витікає з теорії розмірності, для аналізу формування кінематичних і енергетичних характеристик в широкому діапазоні зміни швидкохідності. За допомогою цих комплексів виражаються умови кінематичної і енергетичної подібності в характерних перерізах ПЧ.

3. Удосконалена методика робочого процесу за допомогою, якої встановлена структура залежностей коефіцієнтів втрат, що здійснюють основний вплив на формування оптимального режиму і вид енергетичних характеристик, від гідродинамічних параметрів просторових решіток РК і узагальнених режимних параметрів ГТ.

4. Аналіз дослідних даних показує, що параметр оптимального режиму $\kappa'_I / Q'_I \sim_{opt}$ близький до режиму мінімуму вихрових втрат за РК і визначається, в основному, гідродинамічними параметрами просторових решіток РК λ і μ , що характеризують геометрію вихідної частини лопаті. При заданій геометрії вихідної частини лопаті, $\kappa'_I \sim_{opt}$ істотно залежить від напрямку відносного потоку, що відповідає мінімуму втрат при обтіканні вхідної кромки. Параметр μ_m не залежить від режимних параметрів $n'_I - Q'_I$ і може розглядатися як гідродинамічний параметр решітки РК, визначений геометрією вхідної частини лопаті.

5. Встановлені закономірності формування параметрів оптимального режиму РО ГТ у зв'язку зі зміною швидкохідності.

6. Розроблена методика визначення кінематичних характеристик потоку в характерних перерізах ПЧ в широкому діапазоні зміни швидкохідності. Ці дані дозволяють судити про умову обтікання елементів ПЧ і міру їх узгодження на оптимальному режимі. Дані про кінематичні характеристики потоку отримані за допомогою цієї методики для ряду ГТ з високими енергетичними показниками і можуть бути використані при розробці ПЧ радіально-осьових ГТ близької швидкохідності.

7. Розроблена узагальнена ММ робочого процесу, яка встановлює залежності зміни вихідних параметрів (ККД, потужності, окремих видів втрат енергії) від геометричних і режимних параметрів ПЧ у широкому діапазоні зміни швидкохідності. Показано її застосування для розрахунку і аналізу енергетичних характеристик РО ГТ, а також для оптимізації при проектуванні ПЧ.

8. Розроблено КПП для проектування РК і прогнозування кінематичних і енергетичних характеристик, що базується на розробленій ММ робочого процесу.

9. Показано використання КПП при розробці ПЧ ГЕС Каменг (Індія). Розбіжність між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує 4-6%. Порівняння розрахункових ха-

рактистик з характеристиками, отриманими на основі тривимірної моделі в'язкого потоку рідини, показує розбіжність близько 2-3%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Миронов К. А. Метод расчета энергетических характеристик радиально-осевых гидротурбин / В. А. Колычев, К. А. Миронов, Л. Н. Цехмистро, В. Э. Дранковский // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ «ХПІ», 2001. – Вип. 129. – Ч. 1. – С. 55–64.

Здобувач приймав участь у викладанні методу розрахунку енергетичних характеристик РО ГТ.

2. Миронов К. А. Моделирование кинематических характеристик потока в радиально-осевой гидротурбине при проектировании ее проточной части / В. А. Колычев, В. Э. Дранковский, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова, Л. Н. Цехмистро // Вісник Сумського державного університету. – Суми, 2003. – Вип. 13(59). – С. 124–131.

Здобувач брав участь у моделюванні кінематичних характеристик потоку РО ГТ при проектуванні її ПЧ.

3. Миронов К. А. Применение упрощенной модели рабочего процесса для расчета и анализа энергетических характеристик высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова, Л. Н. Цехмистро, А. В. Сергеев, С. В. Гончаров // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 11. – С. 109–120.

Використовуючи спрощену модель робочого процесу, здобувач брав участь у розрахунку і аналізі енергетичних характеристик високонапірних РО ГТ.

4. Миронов К. А. Улучшение энергетических показателей рабочих колес гидротурбины РО500 при помощи численного моделирования течения в проточной части / К. А. Миронов, В. В. Барлит, С. Рао, Л. К. Харвани // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ «ХПІ», 2004. – № 12. – С. 41–48.

Здобувач показав, як за допомогою даних чисельного моделювання течії в ПЧ покращити енергетичні показники РК ГТ.

5. Миронов К. А. Применение безразмерных параметров для анализа рабочего процесса гидротурбин / В. А. Колычев, И. И. Тыньянова, К. А. Миронов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ «ХПІ», 2005. – № 28. – С. 79–88.

Здобувачем показано застосування безрозмірних параметрів для аналізу робочого процесу ГТ.

6. Миронов К. А. Расчет и анализ баланса потерь энергии в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине / В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова, Л. Н. Цехмистро, В. Э. Дранковский, А. В. Сергеев // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005. – №1/2 (13). – С. 95–106.

Здобувач брав участь у викладанні методики розрахунку і аналізу балансу втрат енергії РО ГТ.

7. Миронов К. А. Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин / В. А. Колычев, К. А. Миронов, И. И. Тыньянова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2006. – № 4/3 (22). – С. 54–64.

Використовуючи загальні кінематичні властивості просторових решіток, а також загальні закономірності взаємодії потоку рідини з РК, здобувач брав участь у аналізі формування енергетичних характеристик ГТ.

8. Миронов К. А. Модификация геометрии рабочего колеса РО 500 на основании расчетных данных CFD / К. А. Миронов, И. И. Тыньянова // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків, 2006. – № 4. – С. 90–95.

Здобувачем була запропонована модифікація РК, що враховує реальну структуру потоку, яка була обчислена за допомогою комерційного програмного комплексу CFD - CFX TASCflow.

9. Миронов К. А. Комплекс прикладных программ для проектирования и расчета радиально-осевых рабочих колес гидротурбин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – № 17. – С. 18–25.

Здобувачем запропонований КПП для розрахунку РК радіально-осьових ГТ з високими енергетичними показниками і проведено порівняння результатів розрахунку РК по різних моделям.

АНОТАЦІЇ

Миронов К.А. Удосконалення проточних частин радіально-осьових гідротурбін на основі математичного моделювання їх енергетичних характеристик. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі – удосконаленню ПЧ радіально-осьових ГТ.

У дисертації розроблена узагальнена ММ втрат у ПЧ радіально-осьових ГТ, яка відображає залежності коефіцієнтів окремих видів гідравлічних втрат від геометричних і режимних параметрів у широкому діапазоні зміни швидкохідності. Показано її застосування для аналізу формування енергетичних характеристик, чисельного дослідження впливу геометричних параметрів ПЧ на енергетичні показники ГТ, узгодження елементів ПЧ у процесі її формування.

Проведено апробацію запропонованих методів і програм для проектування та дослідження характеристик робочого процесу РО ГТ на напори $H = 45 \div 500$ м. За розробленими програмами спроектовано РК високонапірної ГТ РО 500-5Вт для ГЕС Каменг (Індія), розрахункові енергетичні характеристики якого кращі, ніж у номенклатурного РК РО 500/3502.

Наведені результати розрахунку тривимірного в'язкого потоку у ПЧ високонапірної ГТ РО 500-5Вт з використанням комерційного програмного комплексу CFD - *CFX TASCflow* для моделі діаметром РК $D_1 = 500$ мм. Виконаний порівняльний аналіз результатів розрахунку гідравлічних втрат і ККД у РК за допомогою різних моделей течії.

Представлені результати досліджень на гідротурбінному стенді заводу важкого машинобудування ВНЕЛ (м. Бопал, Індія) моделі ПЧ радіально-осьової ГТ з РК РО 500-5Вт діаметром $D_1 = 530$ мм. Порівняння розрахункових прогнозних показників з експериментальними даними показує задовільний збіг результатів.

Ключові слова: радіально-осьова гідротурбіна, проточна частина, робоче колесо, геометричні та режимні параметри, енергетичні показники.

Миронов К.А. Совершенствование проточных частей радиально-осевых гидротурбин на основе математического моделирования их энергетических характеристик. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

Диссертационная работа посвящена решению научно-практической задачи – совершенствованию ПЧ радиально-осевых ГТ.

В диссертации приведен анализ работ, посвященных решению прямой и обратной задач теории рабочего процесса, показано, что для совершенствования ПЧ необходимо знание о закономерностях формирования энергетических характеристик в зависимости от изменения геометрических и режимных параметров.

На основе анализа универсальных характеристик установлены закономерности изменения безразмерных кинематических комплексов в характерных сечениях ПЧ радиально-осевых ГТ на оптимальном режиме в связи с изменением быстроходности. С помощью этих комплексов выражаются условия кинематического и энергетического подобия в характерных сечениях ПЧ. Уста-

новлена структура зависимостей коэффициентов потерь, оказывающих основное влияние на формирование оптимального режима и вид кривых КПД при отходе от него.

Показано, что для анализа формирования энергетических характеристик ГТ наряду с гидродинамическими параметрами λ и μ , характеризующими геометрию выходной части лопасти, необходимо знание гидродинамического параметра μ_m , определяющего направление потока, соответствующего безотрывному обтеканию входной кромки лопасти.

Приведены систематизированные данные о зависимостях гидродинамических параметров пространственной решетки РК от режимных параметров в широком диапазоне изменения быстроходности.

Разработана обобщенная ММ потерь в ПЧ радиально-осевых ГТ, отражающая зависимости коэффициентов отдельных видов гидравлических потерь от геометрических и режимных параметров в широком диапазоне изменения быстроходности. Показано ее применение для анализа формирования энергетических характеристик, численного исследования влияния геометрических параметров ПЧ на энергетические показатели ГТ, согласования элементов ПЧ в процессе ее формирования.

Приведена методика формирования ПЧ, заключающаяся в определении гидродинамических параметров ее элементов, обеспечивающих заданные параметры оптимального режима.

Показано применение полученной обобщенной ММ для решения обратной задачи теории рабочего процесса. Для решения задачи в оптимизационной постановке использовался комплексный метод Бокса.

На основе разработанного описания рабочего процесса составлены алгоритмы и выполнена их программная реализация в виде КПП, программы расчета и построения прогнозной универсальной характеристики.

Проведена апробация предложенных методов и программ для проектирования и исследования энергетических характеристик РО ГТ на напоры $H = 45 \div 500$ м. С помощью численного эксперимента получены зависимости, которые отражают влияние геометрических параметров ПЧ на ее энергетические характеристики. Спроектировано РК высоконапорной ГТ РО 500-5Вт для ГЭС Каменг (Индия), с высокими энергетическими показателями.

Приведены результаты расчета трехмерного вязкого потока в ПЧ высоконапорной ГТ РО 500-5Вт, с использованием коммерческого программного комплекса CFD - *CFX TASCflow* для модели диаметром РК $D_1 = 500$ мм. Выполнен сравнительный анализ результатов расчета гидравлических потерь и КПД в РК с помощью различных моделей течения.

Представлены результаты исследований на гидротурбинном стенде завода тяжелого машиностроения VHEL (г. Бопал, Индия) модели ПЧ радиально-осевой ГТ с РК РО 500-5Вт диаметром РК $D_1 = 530$ мм. Сравнение расчетных показателей с экспериментальными данными показывает удовлетворительное совпадение результатов.

Ключевые слова: радиально-осевая гидротурбина, проточная часть, рабочее колесо, геометрические и режимные параметры, энергетические показатели.

Mironov K.A. Perfection of flow spaces on basis of mathematical modeling of Francis turbines performances. – Manuscript.

The thesis for receiving candidate degree of technical sciences of a speciality 05.05.17 – Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Units. – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, 2009.

The thesis goal is connected with the solution of scientific and technical problem – perfection of Francis turbine flow space. The methodology and CFD tools for investigation of flow space geometry were developed for the Francis turbine of various specific speeds. On the basis of model experimental performance and hydraulic channels geometry the developed methodology is aimed to minimize the energy losses at best efficient point.

The calibration of the methods and programs developed was carried out for Francis turbine ($H = 45 \div 500$ m). By numerical flow simulation the relationships were obtained which establish of geometry parameters on the efficiency performance. This methodology and programs were applied for the

development of Fr 500-5Bm turbines (Kameng HPS, India) with collaboration of BHEL (India). The efficiency performances of this turbines are better than similar ones of the nomenclature Francis flow space Fr 500/3502.

The validation of the Fr 500-5Bm runner was performed by 2D direct cascade problem and 3D certified commercial Code RANS Tascflow for the runner model $D_1 = 500 \text{ mm}$. The agreement of the numerical data are quite satisfactory.

The developed runner Fr 500-5Bm $D_1 = 530 \text{ mm}$ was tested at the BHEL Hydroturbine laboratory (Bhopal, India). The experimental data confirmed the data obtained by numerical simulation of efficiency performance.

Keywords: flow space, Francis turbine, the runner, geometrical and operational parameters, efficiency performances.

Підписано до друку 09.04.2009 р. Формат 60x84¹/₁₆.
Папір офсетний. Друк - різнографія. Умовн. друк. арк. 0,9.
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. № 592641

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 2 480 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.