НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Хатунцев Андрій Юрійович

УДК 621.224

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТЕВОЇ СИСТЕМИ РОБОЧОГО КОЛЕСА ВЕРТИКАЛЬНОЇ ГІДРОТУРБІНИ ОСЬОВОГО ТИПУ

Спеціальність 05.05.17 – Гідравлічні машини
та гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків-2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформатики Сумського державного університету
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Косторной Сергій Дмитрович,
Сумський національний аграрний університет, м. Суми,
професор кафедри вищої математики

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Лур'є Зіновій Якович,
Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри гідравлічних машин;

кандидат технічних наук, доцент
Неня Віктор Григорович,
Сумський державний університет,
в.о. зав. кафедри інформаційних технологій проектування.

Провідна установа - Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться " 21 " грудня 2006 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.11 у Національному технічному університеті „Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "___" _____ 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Ю. О. Юдін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність досліджень. Робота присвячена математичному моделюванню течії рідини в області робочого колеса (РК) гідротурбіни з метою вдосконалення динамічних характеристик лопатевої системи РК вертикальної гідротурбіни осьового типу.

Досліджувана в роботі нестаціонарність викликається в'язкими слідами, що поширюються за лопатками напрямного апарату, підведенням рідини по колу (спіральні підведення з кутом охоплення $<360^0$), поворотом потоку в підводі з відривом потоку і сходом вихорів з лопаті РК. Вивченню особливостей гідродинамічних навантажень на лопаті РК при цьому явищі присвячена дана робота.

Розвинуті в результаті виконання роботи чисельні методи розрахунку просторової течії рідини в області РК у нестаціонарній постановці дозволяють на стадії проектування, з достатньою для практичних цілей точністю, вирішувати такі важливі задачі, як визначення кінематичних параметрів потоку, гідродинамічних навантажень і моментів на лопатях РК, враховувати взаємний вплив елементів на гідродинамічні параметри та більш обґрунтовано приймати варіант проектного рішення на основі обчислювального експерименту.

Широке впровадження методів математичного моделювання течії рідини і розробленого програмного забезпечення в заводську практику дослідження та розрахунків гідротурбін буде сприяти успішному рішенню основних завдань вітчизняного гідротурбобудування, що дозволить успішно конкурувати на міжнародному ринку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана здобувачем на кафедрі інформатики відповідно до договорів між Сумським державним університетом та ВАТ «Турбоатом» (м. Харків) «Розроблення комплексу методик і програмних засобів для оцінки гідродинамічних навантажень на лопатях робочого колеса гідротурбіни осьового типу» і «Розробка гідродинамічних методів розрахунку і дослідження робочого процесу для створення робочих коліс і проточних частин конкурентоспроможних гідротурбін для виконання експортних замовлень», згідно з науковим напрямком кафедри «Моделювання фізичних і гідродинамічних процесів» (рішення НТР СумДУ №5 від 10.02.2000р.), в яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення динамічних характеристик лопатевої системи РК вертикальної гідротурбіни осьового типу на основі високоефективних розрахунково-теоретичних методів дослідження за допомогою ЕОМ. Поставлена мета досягається розробкою та впровадженням в інженерну практику проектування гідротурбін теоретичних методів розрахунку й аналізу гідродинамічних силових і моментних характеристик лопатевих систем, що враховують реальну геометрію й особливості робочого процесу: відрив потоку,

наявність окружної нерівномірності швидкостей при обтіканні лопатевих систем, взаємний вплив елементів проточної частини (ПЧ) й вплив ближнього вихрового сліду за лопатями РК.

Відповідно до поставленої мети основними завданнями роботи були:

- удосконалити метод розрахунку тривимірної течії рідини в ПЧ гідротурбіни з урахуванням взаємного впливу елементів, окружної нерівномірності потоку на вході в РК, ближнього вихрового сліду за лопатями і відриву потоку;
- розробити на основі методу дискретних гідродинамічних особливостей алгоритм і програмне забезпечення розв'язку прямої тривимірної задачі на ЕОМ для ідеальної рідини, що забезпечить більш високу точність розрахунку;
- на основі перспективного алгоритму Московського державного університету (МДУ) розрахунку 2D граничного шару (ГШ) удосконалити програмне забезпечення та виконати розрахунок параметрів ГШ для визначення можливих режимів відривного обтікання;
- провести розрахунково-теоретичні дослідження структури потоку в області РК;
- виконати розрахунково-теоретичний аналіз розроблених методів на основі зіставлення результатів розрахунку й експерименту, оцінити їх точність та ефективність;
- розрахувати для конкретних гідротурбін гідродинамічні сили, моменти, пульсаційні характеристики на лопатях РК.

Об'єкт дослідження - процес течії рідини в області РК гідротурбіни.

Предмет дослідження - структура потоку в ПЧ, характер та величина гідродинамічних параметрів потоку лопатевої системи РК в області робочих режимів гідротурбіни.

Метод дослідження – математичне моделювання течії рідини в реальній ПЧ і чисельна реалізація на ЕОМ алгоритмів на базі класичних моделей потенційної течії ідеальної рідини та граничного шару. Порівняння результатів розрахунку основних параметрів потоку з результатами експериментальних досліджень і розрахунками, виконаними іншими авторами.

Наукова новизна дисертаційної роботи:

- удосконалена математична модель 3D течії рідини в проточній частині в області РК, що дозволяє визначати методом гідродинамічних особливостей гідродинамічні показники на лопатях РК для реальних режимів роботи гідротурбіни;

- вперше проведені чисельні дослідження на основі 3D моделі потоку рідини в області РК гідротурбіни гідродинамічних характеристик потоку і лопатевих систем з врахуванням вихрового сліду за лопатями РК, взаємного впливу елементів і можливих режимів відриву потоку для моделей реальних гідротурбін;

- досліджено вплив нерівномірності потоку перед лопатевою системою, вплив неточності установлення лопатей і розвитку вихрового сліду за лопатями на силові та моментні характеристики робочого колеса;

- по розробленим алгоритмам та програмам, чисельним розрахунком на ЕОМ, отримані гідродинамічні характеристики лопатевої системи РК гідротурбіни з достатньою для практичних цілей точністю.

Практичне значення одержаних результатів:

- розвиті і доведені до практичного застосування теоретичні і чисельні методи моделювання течії рідини в області РК дозволяють визначити з достатньою для практичних цілей точністю гідродинамічні характеристики РК у більш широкому діапазоні, ніж це можливо в рамках безвідривного обтікання;

- розроблені і впроваджені програми розрахунків на ЕОМ параметрів потоку та гідродинамічних навантажень на елементах ПЧ гідравлічних турбін дозволяють за допомогою чисельного експерименту проводити систематичні дослідження та доповнити або замінити фізичний експеримент;

- дана методика, у виді конкретного прикладу для ГЕС Salta Grande (Аргентина), проведення чисельного експерименту цілеспрямованого пошуку кращих варіантів ПЧ відповідно до вимог до динамічних показників гідротурбіни;

- основні результати роботи, включаючи програмне забезпечення розрахунку обтікання лопатевих систем гідромашин і розрахунку гідродинамічних навантажень на елементах ПЧ, а також сервісні програми по оформленню результатів розрахунку і проектування робочих деталей та елементів ПЧ гідротурбіни впроваджені в ВАТ «Турбоатом» розраховані і передані замовникові варіанти елементів ПЧ гідротурбіни для умов ГЕС Salta Grande. (акт впровадження від 07.10.02);

- в ВАТ заводу ім. Фрунзе (м.Суми) виконуються розрахунки швидкостей у ПЧ насосів і їх кінематичних характеристик (акт впровадження від 23.02.04);

- наукові і науково-методичні положення, одержані в дисертації, використовуються в навчальному процесі СумДУ (м.Суми) (акт впровадження від 14.11.05).

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертаційної роботи, винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Поставлення проблем і задач виконано разом з науковим керівником. Здобувачем особисто виконане удосконалення алгоритму чисельної реалізації математичної моделі 3D течії рідини в області РК з використанням панельних гідродинамічних особливостей; розроблений алгоритм і комп'ютерні програми розрахунку параметрів динамічних характеристик 3D потоку в області РК з урахуванням відриву потоку на основі моделі ГШ; проведене моделювання розвитку вихрового сліду за лопатевою системою РК і дослідження його впливу на динамічні характеристики; виконане дослідження впливу помилки установлення лопатевої системи робочого колеса на його динамічні характеристики.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень по дисертаційній темі доповідалися й обговорювалися на: 8-ій міжнародній науковій конференції ім.

академіка М. Кравчука (Київ, 2000 р.); міжнародних науково-технічних конференціях "Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання" (м. Харків, 2000р., 2003 р.); всеукраїнській науковій конференції з прикладної математики та інформатики (Львів, 2001р.); міждержавній науково-методичній конференції "Проблеми математичного моделювання" (Дніпродзержинськ, 2002р.); щорічних наукових конференціях викладачів, співробітників і аспірантів СумДУ (м.Суми, 1998-2002 рр.)

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 11 наукових праць, з них 7 – у виданнях, що входять до переліку фахових видань ВАК України.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації 184 сторінки, у тому числі: 76 рисунки, з яких 14 розміщені на 14 повних сторінках, 3-х додатків на 3-х сторінках, списку використаних джерел з 171 найменувань на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проведення дослідження динамічних характеристик лопатевої системи РК поворотнолопатевої (ПЛ) гідротурбіни осьового типу. Сформульовано мету та задачі дослідження, дана загальна характеристика роботи.

У першому розділі викладені результати інформаційно-аналітичного огляду сучасного стану проблеми, зв'язаної з моделюванням течії в гідротурбіні та розрахунком динамічних характеристик лопатевих систем. Виконано огляд робіт з розрахунку параметрів течії, гідродинамічних навантажень у ПЧ енергетичних машин, методів теоретичного й експериментального моделювання потоку.

У другому розділі приводиться розв'язок 3D задачі відривного обтікання лопатей РК ПЛ гідротурбіни в'язким потоком. Розглянуто алгоритм розрахунку просторового відривного обтікання лопаті та розрахунку гідродинамічних навантажень на лопаті у випадку відривного обтікання.

Обтікання лопаті в'язкою нестисливою рідиною досліджується в зв'язаній з лопаттю системі координат ОХУ, початок якої розташовано на осі обертання, а вісь OY збігається з віссю повороту лопаті (рис.1).

Нехай у деякий момент часу t=0 граничні умови на лопаті змінюються по довільному закону, причому

$$W_n=f(x_0,y_0,z_0,t), \qquad (1)$$

де W_n – нормальна складова переносної швидкості в точці на поверхні з координатами x_0,y_0,z_0; $f(x_0,y_0,z_0,t)$ – відома функція координат і часу.

Рис.1. Розрахункова схема Рис. 2. Геометрична розрахункова модель

При обтіканні лопаті в'язким потоком будемо виділяти дві області: область нев'язкої течії поза лопатью і граничним шаром та область в'язкої течії в граничному шарі.

Нехай у загальному випадку відривного обтікання потік сходить з вихідної крайки лопаті на робочій стороні (система I), а на тильній стороні (система II) по лінії Ls (рис.1). Це приводить до руху рідини з утворенням поверхонь тангенціального розриву швидкості – вихрових завіс. Нехай ці поверхні описуються рівняннями виду $\sigma_i(x,y,z,t)=0 (i=1,2)$, а рівняння поверхні лопаті має вигляд: $S(x_0,y_0,z_0)=0$. Передбачається, що скрізь, поза поверхнею лопаті, граничного шару і вихрового сліду, течії безвихрова. Тоді для потенціалу швидкостей $\psi(x,y,z,t)$ поза S і σ_i справедливе рівняння Лапласа, а на поверхні лопаті виконується умова непротікання

$$(\frac{\partial \psi}{\partial x} - w_{xs})n_x + (\frac{\partial \psi}{\partial y} - w_{ys})n_y + (\frac{\partial \psi}{\partial z} - w_{zs})n_z = 0. \qquad (2)$$

Тут $\vec{w}_s = \{w_{xs}, w_{ys}, w_{zs}\}$ – вектор швидкості руху точок лопаті; $\vec{n}(n_x, n_y, n_z)$ - орт зовнішньої нормалі до поверхні лопаті S у розглянутій точці.

При переході через поверхні σ_i вихрового сліду повинна дотримуватися умова безперервності тиску і нормальної складової швидкості

$$P_+ = P_-, \quad (\nabla\psi\vec{n})_+ = (\nabla\psi\vec{n})_-, \quad (x,y,z) \in \sigma_i, \qquad (3)$$

де індекси (+) і (-) позначають різні сторони поверхні σ_i.

На нескінченному віддаленні від лопаті і її сліду вплив від них повинен загасати, тому

$$\lim_{r\to\infty} \nabla\psi = 0, \quad r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}, \; x,y,z \to \infty. \qquad (4)$$

На задній та бічній точках лопаті, з яких сходять вихрові завіси, повинна виконуватись гіпотеза Чаплигіна-Жуковського. Позначивши через L_s лінію сходу потоку з точок, запишемо

$$P_+ = P_-, \nabla\psi_+ \to \nabla\psi_-, (x,y,z) \in L_s. \qquad (5)$$

Через те, що розглядається нестаціонарна задача, то в будь-який момент часу повинна виконуватись теорема Томсона про незмінність циркуляції швидкості по будь-якому замкнутому контуру, проведеному через ті самі частки рідини. Отже, розрахунок гідродинамічних характеристик лопаті зводиться до знаходження потенціалу швидкостей $\psi(x,y,z,t)$, що задовольняє всім вказаним вище умовам, які повинні виконуватися в кожний розрахунковий момент часу для розглянутого нестаціонарного обтікання лопаті. Крім того, у кожен розрахунковий момент необхідно знати положення лінії L_s відриву потоку з тильної поверхні лопаті (рис.1)

Сформульована задача є нелінійною. Для лопаті це означає, що на величину кута атаки, кривизну та товщину лопаті обмеження не накладаються, а гранична умова (1) виконується безпосередньо на поверхні лопаті, вихровий слід за лопатью може деформуватися.

Задача визначення динамічних характеристик обтікання тіла зводиться до знаходження інтенсивності гідродинамічних особливостей на поверхні тіла й в сліді при наступних умовах:

1. Поверхня тіла є непротікаємою.

2. На завісі вільних вихорів немає перепаду тисків, тобто точки цієї завіси рухаються зі швидкостями основного потоку.

3. По контуру, що охоплює тіло і слід за ним, циркуляція швидкості дорівнює нулю.

Перша умова у загальному випадку приводить до системи рівнянь, що відповідає умові непротікання поверхні при відносному русі і руху вільних вихорів в сліді зі швидкістю потоку. Обтічне тіло з поверхнею S моделюємо панелями джерел-стоків і вихрових відрізків постійної інтенсивності. З цієї поверхні сходять *k* штук вихрових завіс γ_p, *p=1,2,...,k,* вільних вихорів.

Для визначення $q(x,y,z,t)$ і $\gamma(x,y,z,t)$ на S і γ_i використовуються гранична умова (2), гіпотеза Чаплигіна-Жуковського, початкові умови задачі, а також теорема про незмінність циркуляції по замкнутому контуру. Величини, що входять в ці умови, залежать від форми поверхонь γ_i. В свою чергу, просторова форма сліду може бути визначена, якщо відомі $\gamma(x,y,z,t)$ і $q(x,y,z,t)$.

Для визначення лінії L_s відриву потоку з тильної поверхні лопаті залучається механізм в'язкої взаємодії.

Ідея чисельного методу складається в переході від безперервних розподілів і процесів до дискретних. Безперервний шар джерел-стоків і вихровий шар, що заміняють поверхню лопаті, моделюються системами дискретних панелей джерел-стоків і вихрових відрізків з постійною по довжині циркуляцією (рис.2). Безперервний процес зміни граничних умов, параметрів течії, гідродинамічних навантажень замінюється дискретним. Вважається, що вони змінюються стрибком у деякі розрахункові моменти часу r, а в проміжку між ними залишаються незмінними. У зв'язку з тим, що розглядається обтікання лопаті в просторовому потоці, моделюється кожна лопать.

На кожному розрахунковому куті атаки α визначення інтенсивності джерел-стоків, циркуляції вихорів і положення вихрових відрізків у системах I і II проводиться послідовно по кроках, починаючи з r=1. При цьому вважається, що в перший розрахунковий момент (r=1) відрив ще не виник і система II не утворилася. Лопать обтікається безвідривно нев'язким потоком (утворилася лише система I). При цих умовах складається і розв'язується система рівнянь і визначаються інтенсивності джерел-стоків і циркуляції γ. За цими значеннями визначається поле швидкостей на лопаті, проводиться розрахунок параметрів ГШ і знаходиться положення лінії

відриву. Далі розраховуються циркуляції вільних вихорів по швидкості в ГШ і визначаються координати вільних вихрових відрізків систем I і II для наступного моменту часу. У момент часу r=2, та далі, обтікання вважається відривним (система II вже утворилася) і описана вище процедура повторюється до заданого моменту часу або до встановлення в середньому режимі обтікання при заданих граничних і початкових умовах.

Для визначення коефіцієнта тиску на поверхні лопаті при його нестаціонарному відривному обтіканні використовуємо інтеграл Коши-Лагранжа для випадку відносного руху, що записується у вигляді

$$P = 1 - w_\tau^2 - 2\left(\frac{\partial \psi}{\partial t} - W_x W_x^* - W_y W_y^*\right), \qquad (6)$$

де: w□ - дотична складової швидкості в розглянутій точці; ψ - безрозмірний потенціал течії; $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ - похідна в рухливій системі координат; W_x, W_y - складові абсолютної швидкості; W_x^*, W_y^* - складові переносної швидкості.

Безрозмірні коефіцієнти сил Cx, Cy і моменту Cm профілю визначаються за формулами

$$Cx = \oint \left[\tau_w n_y - P n_x\right] ds, \quad Cy = -\oint \left[P n_y + \tau_w n_x\right] ds,$$
$$Cm = \oint \left\{x\left[P n_y + \tau_w n_x\right] - y\left[P n_x - \tau_w n_y\right]\right\} ds, \qquad (7)$$

де τ_W - напруга тертя.

Як і у випадку нестаціонарного безвідривного обтікання, розрахунок проводиться по контуру профілю лопаті перетину r = const. При нестаціонарному відривному обтіканні лопаті в'язким потоком виділяються два характерних випадки у визначенні гідродинамічних навантажень.

Один з них відповідає першому розрахунковому моментові (РМ = 1), коли ще немає вихрової системи II, а другий – будь-якому наступному моменту (РМ>1), коли відрив ГШ вже виник і є вихрова система II. Для першого випадку (РМ=1) розрахунок гідродинамічних навантажень проводиться аналогічно випадку безвідривного обтікання лопаті.

В другому випадку (РМ>1) при визначенні гідродинамічних навантажень необхідно враховувати циркуляцію вихрової системи II. Розрахунок для нижнього контуру і для ділянки верхнього до точки відриву не відрізняється від попереднього випадку. А для ділянки за точкою відриву необхідно включити циркуляцію вихрової системи II. Це обумовлено тим, що зміна циркуляції по контру L_b за розрахунковий проміжок часу Δt відбувається не тільки за рахунок зміни циркуляції сумарних вихорів на лопаті, але і за рахунок сходу в потік вільних вихорів системи II.

Підсумовуючи гідродинамічне навантаження, обчислене на перетинах лопаті та по його розмаху, можна визначити розподілені і сумарні характеристики лопаті.

У третьому розділі розглядається нестаціонарне обтікання 2D профілів в’язкою рідиною. При розробці програми розрахунку відривного нестаціонарного обтікання лопатевих систем гідромашин у роботі використаний алгоритм чисельного розрахунку плоского ГШ, розроблений в обчислювальному центрі МДУ. Цей алгоритм застосований для випадку обтікання рухомих тіл. Розглянуті особливості розрахунку турбулентного ГШ і використана в програмі двошарова модель турбулентної в'язкості Клебанова-Ван-Дріста. Викладено загальну схему розрахунку течії в ГШ і її особливості. Приведено алгоритм розрахунку перехідної області. Виконано дослідження з методики розрахунку параметрів ГШ і зроблене порівняння з результатами експериментальних досліджень для випадку нерухомого циліндру та циліндра, який обертається.

Для інтегрування системи диференціальних рівнянь стаціонарного ГШ застосована кінцево-різницева апроксимація по двошаровій неявній шеститочечній схемі, а нестаціонарного по двенадцатиточечній, тому що застосування явних схем у цьому випадку вкрай нераціональне у зв'язку з істотним обмеженням на відношення кроків сітки в силу стійкості. Система алгебраїчних рівнянь кінцево-різницевої апроксимації розв’язується методом прогону. Для завдання початкових профілів подовжньої і поперечної швидкості в ГШ і його товщині використане точне рішення Навье-Стокса для плоскої течії поблизу критичної точки. Зовнішня границя ГШ визначається шляхом асимптотичного виходу подовжньої швидкості на значення швидкості в нев'язкій області.

Використана в програмі двошарова по товщині ГШ модель турбулентної в'язкості задовільно погоджується з відомими експериментальними даними Клебанова. За точку відриву стаціонарного і нестаціонарного ГШ приймається така точка на поверхні обтікання, при наближенні до якої похідна від подовжньої швидкості по нормалі на стінці прагне до нуля або спостерігається різке збільшення похідних всіх параметрів по подовжній координаті і збільшення необхідного числа ітерацій для досягнення розв’язку системи диференціальних рівнянь ГШ. На рис.3 представлена загальна схема розрахунку ГШ, а на рис.4 розрахункова схема течії в ГШ.

Розрахунки відривного обтікання профілю показали, що через сильну взаємодію вільних вихрових завіс течія в області вихідної точки інтенсивно змінюється в часі. Тому в деякі проміжки часу на поверхні можуть виникати кілька точок початку і точок відриву ГШ. Для обліку впливу ГШ на обтікання тіла в даній схемі її поверхня після розрахунку нев'язкої течії повинна збільшуватися на товщину витиснення і проводиться повторний розрахунок. У даній роботі такі ітерації не передбачалися, але схема їх виконання розглянута.

Вихрові завіси, що моделюють відрив ГШ, заміняються системою вільних дискретних вихорів. Циркуляція чергового вільного вихору, що з'явився в даний розрахунковий момент часу r, визначається величиною завихореності ГШ у точці його відриву. Центр завихореності ГШ розташовується на відстані товщини витиснення δ^*. У даній схемі вважається, що вільний вихор Δ^r між розрахунковими моментами часу r і (r+1) переміщається в своє нове положення зі

швидкістю течії в ГШ. В точці відриву величини подовжньої і поперечної швидкості одного порядку, і тому рух вихрової завіси відбувається не по напрямку дотичної до поверхні, а під деяким кутом, обумовленим величинами U і V.

При розрахунку нестаціонарних характеристик профілів початковою умовою в області нев'язкої течії є результати розв’язку задачі про їх стаціонарне безвідривне обтікання. Використовуючи розподіл швидкості нев'язкого потоку на поверхні профілю, отримане з початкових умов, визначається положення передньої критичної точки k, від якої розраховується ГШ до точок відриву R_1 і R_2 (рис.4).

Після цього при наступному кроці знову робиться розрахунок нев'язкого обтікання профілю, але вже з врахуванням вільних дискретних вихорів, що з'явилися унаслідок відриву ГШ у точках R_1 і R_2 у попередній момент часу. Отриманий розподіл швидкості використовується для розрахунку ГШ у даний момент часу та пошуку нового положення точок відриву R_1 і R_2.

У випадку утворення зворотної течії на якій-небудь поверхні профілю внаслідок взаємодії на потік вільних вихрових завіс, які моделюють відрив ГШ, що розвивається від передньої крайки профілю з виникненням другої критичної точки k_2 (рис.4), проводиться також розрахунок ГШ і від цієї критичної точки.

Послідовним розв’язком розглянутої задачі на кожнім кроці часу вивчається закон руху точок відриву, формування і розвиток всієї картини відривного обтікання профілю і визначаються його нестаціонарні характеристики. При цьому моментом досягнення сталого в середньому режимі відривного обтікання профілю вважається такий момент часу, після якого середні в часі значення його характеристик, положення критичних точок і точок відриву залишаються незмінними.

Рис.3. Схема граничного шару

Рис.4. Розрахункова схема течії в граничному шарі

На основі розрахунків параметрів відривного обтікання циліндра, що обертається, вдалося змоделювати й відтворити чисельно ефект Магнуса, який полягає в різкому зниженні підйомної сили та лобового опору, коли раптово змінюється режим обтікання, що пов’язано з перехідними явищами в ГШ. Такі режими називають критичними. Цей ефект був експериментально досліджений Бичковим Н.М. і Коваленко В.М., а Котовським В.Н. чисельним моделюванням. У виконаних в роботі дослідженнях основні результати розрахунку відривного обтікання циліндра практично погоджуються з роботами зазначених авторів, що можна пояснити використанням

однакового алгоритму розрахунку й акуратністю програмної реалізації. Підтверджені результати розрахунків відривного обтікання тіл на тестових задачах послужили підставою для практичних розрахунків та дослідження динамічних характеристик лопатевої системи РК гідравлічної турбіни осьового типу.

У четвертому розділі «Практичне застосування розроблених методів до розрахунку гідродинамічних характеристик робочого колеса реальних гідротурбін» приведені результати чисельного моделювання параметрів течії 3D потоку в області робочого колеса ПЛ гідротурбіни і динамічних характеристик лопатевої системи РК для ГЕС Salta Grande (Аргентина). Розраховано кінематичні характеристики течії та зроблений порівняльний аналіз 2D и 3D розв'язків прямої задачі для РК в широкому діапазоні режимів роботи гідротурбіни. Визначено координати точок відриву в перетинах R=const і лінії відриву на лопаті. Проведено дослідження впливу нерівномірності потоку на вході в РК, неточності встановлення лопатей і вихрового сліду за лопатевою системою РК на гідродинамічний поворотний момент лопаті.

На рис. 5, 6 показане порівняння епюр відносних швидкостей в перетинах моделі лопаті R=const і точок відриву, отриманих в результаті розв'язку 2D и 3D прямих задач для лопаті РК 587а на режимі Q'_1=1240 л/с; n'_1=167об/хв; а0=32мм; φ=0. Положення точок відриву визначено за методикою, наведеною раніше.

Рис.5. Перетин R=218.6мм, φ=0, $Q`_1$=1240л/с, $n`_1$=167об/хв, а0=32мм.

Рис. 6. Перетин R=105.2мм, φ=0, $Q`_1$=1240 л/с, $n`_1$=167об/хв, а0=32мм

(2D - штрихова лінія, 3D - неперервна лінія)

При розв'язку 2D задачі параметри V_∞ і кут натікання на профіль α_∞ приймалися за результатами розв'язку тривимірної задачі. Кут атаки визначався різницею між кутом установки профілю та кутом відносної швидкості течії. Положення точок відриву на профілі й ліній відриву на лопаті визначено за результатами розрахунку ГШ за один оберт ротора, тобто коли V_∞ і α_∞ приймали значення в момент часу *t*. На рис. 7 показані осереднені положення ліній відриву потоку. Розрахункові дослідження показали, що осереднені значення кутів атаки в перетину R=const і по розмаху лопаті на комбінаторних режимах змінюються до 10^0.

Рис. 7. Лінія відриву граничного шару на лопаті ПЛ587а.

а) робоча сторона лопаті; б) тильна сторона лопаті

(Режим 1 - Q'_1 =1240 л/с, n'_1 =167про/хв, φ=0^0, a_0=32,2мм)

(Режим 2 - Q'_1 =1420 л/с, n'_1 =167про/хв, φ=17^0, a_0=41мм)

На рис. 9 приведені результати розрахунку поворотного гідравлічного моменту на лопаті РК ПЛ587, для якої є аналогічні експериментальні дані, а на рис. 8 для лопаті РК гідротурбіни Salta Grande.

Рис.8. Приведений поворотний гідравлічний момент, що діє на лопать РК гідротурбіни Salta Grande (Аргентина), кг·м.

На рис. 11 показані пульсації коефіцієнту тиска в потоці за лопатями РК. Кількість розрахункових моментів часу – 600, що відповідає 30 обертам ротора РК. Розрахункові точки в потоці розташовувалися в перетинах I, II, III на радіусі $R_1=0.25D_1$ і на відстані 10 мм, 50 мм і 100 мм від вихідної точки лопаті. На рис. 10 зображена розрахункова схема і вихровий слід за лопатями РК після 30 обертів.

Розрахункова схема для визначення приведеного поворотного гідравлічного моменту, що діє на лопать РК під час робочого процесу, враховує спіральну камеру, колони статора і лопатки напрямного апарату.

Зміна приведеного поворотного гідравлічного моменту при обертанні РК у різних положеннях лопаті в ПЧ зображена на рис. 12. На рисунках штриховою лінією зображено осереднене значення моменту.

Рис. 9. Приведений гідравлічний момент на лопаті РК ПЛ587, кг·м

Аналіз результатів розрахунку показує, що в реальній ПЧ гідравлічний поворотний момент на лопаті РК в процесі роботи тільки за рахунок нерівномірності потоку на вході змінюється в межах 10% в порівнянні з осередненою величиною моменту, одержаною на основі експериментальних досліджень.

У розрахунковій схемі для оцінки впливу неточності встановлення лопатей РК на приведений поворотний гідравлічний момент враховуються тільки лопатки напрямного апарату, що відповідає осесиметричній постановці задачі.

Рис. 10. Розрахункова схема

Результати розрахунку приведеного поворотного гідравлічного моменту на кожній лопаті РК представлені на рис. 13 і 14. У прикладі рис.13 лопать № 3 установлена на кут $\varphi = -6^0$, а всі інші на кут $\varphi = -4{,}8^0$. На рис. 14 показані результати розрахунку, коли всі лопаті установлені з

різними кутами. Штриховою лінією зображений випадок, коли всі лопаті установлені на кут $\varphi = -4{,}8^0$.

Рис. 11. Пульсації коефіцієнта тиску в точці перетину № 3 за 600 моментів часу
а) $Q`_1$=1270 л/с, $n`_1$=130 об/хв, φ =+6^0 б) $Q`_1$=760 л/с, $n`_1$=130 об/хв, φ =-5^0

Рис.12. Зміна приведеного поворотного гідравлічного моменту на лопаті
а) $n`_1$=130 об/хв, $Q`_1$=1270 л/с, φ =6^0, a_0=29.5, МВ=0,5 с
б) $n`_1$=145об/хв, $Q`_1$=830л/с, φ = -4,8^0, a_0=21.7, МВ=0,4 с

Систематичними дослідженнями встановлено, що неточність установки лопатей у межах 1-2^0 приводить до нерівномірного розподілу величини поворотного моменту на кожній лопаті до 20 %.

Розрахункова схема для оцінки впливу вихрового сліду на поворотний гідравлічний момент, що діє на кожну лопать РК, зображена на рис.10. Вона містить у собі лопатки напрямного апарату, область РК колеса і безпосередньо лопаті РК, установлені відповідно до теоретичного креслення.

Результати розрахунку приведеного поворотного гідравлічного моменту, що діє на лопать РК для одного режиму, з урахуванням вихрового сліду з першого моменту сходу представлені на рис. 14.

Рис. 13. Приведений поворотний гідравлічний момент на лопатях РК
а) $n`_1$=130 об/хв, $Q`_1$=760 л/с, $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_5 = \varphi_6 =$ -4,8^0, $\varphi_3 =$ -6^0
б) $n`_1$=130 об/хв, $Q`_1$=760 л/с, $\varphi_1 =$ -5^0, $\varphi_2 =$ -6,2^0, $\varphi_3 =$ -5,4^0, $\varphi_4 =$ -4,5^0, $\varphi_5 =$ -4,2^0, $\varphi_6 =$ -4,8^0

Рис. 14. Зміна приведеного гідравлічного моменту, що діє на лопать робочого колеса ПЛ587 з урахуванням вихрового сліду з початкового моменту на режимі $n`_1$=130 об/хвил, $Q`_1$=760л/с, φ = -4.8^0 за 250 моментів часу(10-ть обертів лопаті)
а) потік на вході в область РК рівномірний;
б) з урахуванням нерівномірності потоку на вході в область РК

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача моделювання й аналізу динамічних характеристик лопатевої системи РК ПЛ гідротурбіни осьового типу для визначення шляхів підвищення ефективності її роботи. Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розв'язана пряма задача 3D течії рідини з врахуванням впливу нерівномірності потоку, взаємодії всіх елементів турбіни, граничного шару та вихрового сліду.

2. Розроблено комплекс прикладних програм проведення чисельного експерименту для розрахунку гідродинамічних навантажень на лопаті робочого колеса в широкому діапазоні режимів роботи турбіни.

3. Отримані параметри потоку в області РК та гідравлічні поворотні моменті, що діють на лопать РК, порівняні з результатами експерименту та даними, отриманими іншими авторами. Проведено тестування розрахунку граничного шару з точними аналітичними розв'язками. Все це свідчить про ефективність запропонованих у роботі методів математичного моделювання течії рідини та їх чисельної реалізації, що позволяє частково замінити або доповнити фізичний експеримент обчислювальним.

4. Аналіз розв'язку прямої задачі показав, що розподіл швидкостей по контуру профілю в тривимірному потоці з врахуванням впливу напрямного апарату практично узгоджується з розв’язком двовимірної задачі при умові, коли величина і напрямок відносної швидкості для двовимірної задачі прийнята за результатами розв’язку тривимірної задачі. Таке погодження найбільш повне для периферійних перетинів, а в області кореневого перетину неузгодженість більш істотна, що можна пояснити впливом корпусу РК. Осереднений за часом кут атаки на комбінаторному режимі роботи турбіни по розмаху лопаті змінюється від 0^0 до 10^0.

5. Потік у проточній частині РК є тривимірним. Відхилення окружної складової швидкості Vu від осередненого значення для камери з кутом охоплення 180^0 досягає до 90%, радіальної складової Vr - до 35%, а осьової Vz - до 30%. Нерівномірність потоку при максимальному відкритті значно більша, ніж на мінімальному.

6. У ПЧ вертикальної ПЛ гідротурбіни з кутом охоплення спіральної камери 180^0 за один оберт РК величина моменту повороту лопаті змінюється в порівнянні з осередненим значенням в межах 10%, а неточність установки лопаті у межах 1-2 градусів, приводить до нерівномірного розподілу величини моменту повороту на кожній лопаті до 20%. Величина моменту повороту лопаті може відрізнятися від експериментальних значень до 40% внаслідок того, що розрахунок виконується для конкретного моменту часу.

7. Науково-методичні положення, одержані в дисертації, використані в навчальному процесі кафедри інформатики СумДУ. Результати розрахунків та розроблене програмне забезпечення використані в проектній діяльності ВАТ “Турбоатом” (м.Харків) та СКБ хімобладнання ВАТ “Сумське машинобудівне науково-виробниче об’єднання ім. М.В.Фрунзе”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Косторной С.Д., Хатунцев А.Ю. Дослідження структури потоку в проточній частині гідромашин // Вісник Сумського державного аграрного університету.-Суми: СДАУ.- 1999.- № 3.- С. 12-17.

Здобувачем виконано аналіз структури потоку на виході спіральної камери.

2. Косторной С.Д., Хатунцев А.Ю. Особливості розрахунку гідродинамічних навантажень на робоче колесо // Вісник Сумського державного аграрного університету. -Суми: СДАУ.-2000 .- № 5.-. С. 167-171.

Здобувачем проведено дослідження розвитку відриву і зміни під`ємної сили на лопаті робочого колеса осьової гідротурбіни.

3. Косторной С.Д., Борозенец Н.С., Мартынова Н.С., Хатунцев А.Ю. Компьютерное моделирование задач обтекания в дозвуковом потоке // Вісник Сумського державного університету. -Суми: СумДУ.-2001.- № 3-4.- С. 169-176.

Здобувачем виконано розрахунок гідродинамічних сил і моментів на лопатях робочого колеса.

4. Косторной С.Д., Мартынова Н.С., Хатунцев А.Ю. Оценка силовых и энергетических характеристик ПЛ гидротурбины на основе вычислительного эксперимента // Математическое моделирование. - Днепродзержинск: -ДГТУ. -2002.- №1(8). - С.26-30.

Здобувачем виконано розрахунок гідродинамічних моментів на лопоті робочого колеса ПЛ20/811.

5. Хатунцев А.Ю. Розрахунок нестаціонарних характеристик потоку за робочим колесом осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни. // Вісник Сумського національного аграрного університету. -Суми: СНАУ.-2003.- № 10.- С. 40-46.

6. Хатунцев А.Ю. Исследование гидродинамических нагрузок на лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной гидротурбины // Вісник Сумського державного університету. -Суми: СумДУ.-2004.- № 2.- С. 44-48.

7. Косторной С.Д., Хатунцев А.Ю., Волик А.А., Борозенец Н.С. Особенности методики расчета пограничного слоя // Вісник Сумського національного аграрного університету. -Суми: СНАУ.-2004.- № 12.-С. 20-33.

Здобувачем по запропонованій методиці виконано розрахунок течії в граничному шарі на циліндрі, що обертається.

8. Косторной С.Д., Борозенец Н.С., Мартынова Н.С., Хатунцев А.Ю. Системы интегро-дифференциальных уравнений в задачах математического моделирования течения жидкости в проточной части лопастных гидравлических машин // Матеріали 8-й Міжнародної наукової конференції ім. М. Кравчука.- Київ.- 2000.- С.110.

Здобувачем розглянута чисельна реалізація інтегрально - диференційних рівнянь прямої задачі моделювання течії в проточній частині гідротурбіні.

9. Косторной С.Д., Борозенец Н.С., Мартынова Н.С., Хатунцев А.Ю. Компьютерное моделирование задач обтекания в дозвуковом потоке // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции "Совершенствование тубоустановок методами математического и физического моделирования". – Харьков: Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины, 2000.-С.135.

Здобувачем розраховані гідродинамічні навантаження та оцінені втрати енергії на лопатях робочого колеса.

10. Хатунцев А.Ю., Мартинова Н.С. Моделювання тривимірної потенційної течії в гідравлічній турбіні // Тези доповідей 4-й Всеукраїнської студентської наукової конференції з прикладної математики та інформатики. - Львів: ЛНУ, 2001.- С. 69.

Здобувачем реалізована математична модель течії рідини в проточній частині гідротурбіни.

11. Косторной С.Д., Мартынова Н.С., Хатунцев А.Ю. Оценка силовых и энергетических характеристик ПЛ гидротурбины на основе вычислительного эксперимента // Тези доповідей Міжнародної науково-методичної конференції „Проблеми математичного моделювання".- Дніпродзержинськ: -ДДТУ.- 2002.- С.137-138.

Здобувачем виконано розрахунок гідродинамічних моментів на лопоті робочого колеса ПЛ20/811.

АНОТАЦІЯ

Хатунцев А.Ю. Математичне моделювання, розрахунок та дослідження динамічних характеристик лопатевої системи робочого колеса вертикальної гідротурбіни осьового типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.17 - гідравлічні машини і гідропневмоагрегати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2006.

Дисертація присвячена актуальному питанню моделювання й аналізу динамічних характеристик робочого колеса осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни вертикального типу з метою визначення шляхів підвищення ефективності її роботи.

Актуальність дослідження обумовлена тим, що чисельні методи розрахунку просторової течії рідини в області робочого колеса у нестаціонарній постановці дозволяють на стадії проектування, з достатньої для практичних цілей точністю, розв'язувати такі важливі проблеми як визначення кінематичних параметрів потоку, гідродинамічних навантажень і моментів на лопатях робочого колеса гідротурбіни в широкому діапазоні режимів роботи.

В дисертаційній роботі приводиться розв'язок 3D задачі відривного обтікання лопатей робочого колеса гідротурбіни в'язким потоком. Запропоновано алгоритм розрахунку просторового відривного обтікання лопаті методом гідродинамічних особливостей за допомогою панелей джерел-стоків. Викладено алгоритм розрахунку гідродинамічних навантажень на лопаті у випадку відривного обтікання.

Розглядається алгоритм нестаціонарного обтікання 2D профілів в'язкою рідиною. Приведено алгоритм розрахунку плоского нестаціонарного граничного шару для випадку обтікання нерухомих тіл і тіл, що обертаються навколо осі з кутовою швидкістю кінцево-різницевим методом.

В роботі приведені результати чисельного моделювання течії 3D потоку в області робочого колеса на прикладі гідротурбіни Salta Grande (Аргентина).

Ключові слова: гідротурбіна, робоче колесо, відрив граничного шару, вихровий слід, гідродинамічні характеристики.

АННОТАЦИЯ

Хатунцев А.Ю. Математическое моделирование, расчет и исследование динамических характеристик лопастной системы рабочего колеса вертикальной гидротурбины осевого типа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 - гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2006.

Диссертация посвящена актуальному вопросу моделирования и анализа динамических характеристик рабочего колеса осевой поворотно-лопастной гидротурбины вертикального типа с целью определения путей повышения эффективности ее работы.

Актуальность исследования обусловлена тем, что численные методы расчета пространственного течения в области рабочего колеса в нестационарной постановке позволяют на

стадии проектирования, с достаточной для практических целей точностью, решать такие важные проблемы, как определение кинематических параметров потока, гидродинамических нагрузок и моментов на лопастях рабочего колеса гидротурбины в широком диапазоне режимов работы.

В диссертационной работе приводится решение 3D задачи отрывного обтекания лопастей рабочего колеса гидротурбины вязким потоком. Предложен алгоритм расчета пространственного отрывного обтекания лопасти методом гидродинамических особенностей, в котором в качестве гидродинамической особенности принята панель источников-стоков. Изложен алгоритм расчета гидродинамических нагрузок на лопасти в случае отрывного обтекания.

Рассмотрен алгоритм нестационарного обтекания 2D профилей вязкой жидкостью. Приведен алгоритм расчета плоского нестационарного пограничного слоя для случая обтекания неподвижных тел и тел, вращающихся вокруг оси с угловой скоростью конечно-разностным методом. Рассмотрены особенности расчета турбулентного пограничного слоя. В работе использована двухслойная модель турбулентной вязкости Клебанова-Ван-Дриста. Изложена общая схема расчета течения в пограничном слое и особенности предложенной схемы. Приведен алгоритм расчета переходной области. Выполнены исследования по методике расчета параметров пограничного слоя и сделано сравнение с результатами экспериментальных исследований для случая неподвижного и вращающегося цилиндров.

В работе приведены результаты численного моделирования течения 3D потока в области рабочего колеса на примере гидротурбины Salta Grande (Аргентина). Рассчитаны кинематические характеристики течения, сделан сравнительный анализ 2D и 3D решений прямой задачи для рабочего колеса и рассчитаны координаты точек отрыва в сечениях R=const и линии отрыва на лопасти. Проведено исследование влияния неравномерности потока на входе в рабочее колесо, неточности сборки лопастей, вихревого следа, сходящего с лопастей на гидродинамический поворотный момент лопасти.

Ключевые слова: гидротурбина, рабочее колесо, отрыв пограничного слоя, вихревой след, гидродинамические характеристики.

SUMMARY

Khatunsev A. Mathematical modeling, calculation and analysis of the dynamical characteristics of the paddle-wheel of the vertical axial-flow water turbine. –Manuscript.

The dissertation for awarding of an academic degree “Doctor” in the field of engineering science with specialization 05.05.17 – hydraulic machines and hydropneumatic aggregates. National technical university “Kharkov polytechnical institute”, Kharkov, 2006.

The dissertation is devoted to an actual problem of modeling, calculation and analysis of the dynamical characteristics of the water wheel of the vertical axial-flow water turbine. The main aim of the research is a determination of the ways to increase an efficiency of turbine's work.

Present the algorithm and solution of the 3D problem of the tear-off flow of the water wheel's paddles by a viscous flow using method of the hydrodynamical features. In this method a panel of the sources – drains is taken as a hydrodynamical feature. The algorithm for calculation of the hydrodynamic loads on the paddles of the water wheel in the case of tear-off flow is also stated.

Considers the algorithm of the nonstationary flow of the 2D profiles by a viscous liquid. The algorithm for calculation of the plane nonstationary boundary layer (interface) for the cases of a flow of the motionless bodies and bodies rotating around axis with angular velocity by the finite-difference method is given.

The results of the numerical modeling of the 3D flow in the region of water wheel of the Salta Grande (Argentina) turbine are presented.

Keywords: Water turbine, water wheel, separation of the boundary layer, vortex track/trace/trail, hydrodynamic characteristics.

Підписано до друку 07.11.2006. Формат 60х84/16. Папір офсетний.
Друк офсетний Ум. друк. арк. 1,1. Замовл. №
Обл. – вид. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Видавництво СумДУ. Свідоцтво ДК№2365 від 08.12.2005р.
40007, м.Суми, вул., Р.-Корсакова, 2.
Друкарня СумДУ. 40007, м.Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.