

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Мартинова Наталія Сергіївна

УДК 621.224

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК СИЛОВИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПІДВОДУ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ГІДРОТУРБИНИ ОСЬОВОГО ТИПУ ПРИ  
ПРОЕКТУВАННІ ЇЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ**

Спеціальність 05.05.17 – Гідравлічні машини  
та гідропневмоагрегати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків- 2005

Дисертацією є рукопис.

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

**Науковий керівник -**

доктор технічних наук,  
професор  
**Косторной Сергій Дмитрович,**  
Сумський національний  
аграрний університет,  
м. Суми,  
професор кафедри  
вищої математики і фізики

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Лур'є Зіновій Якович**, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, професор кафедри гідравлічних машин;

кандидат технічних наук **Давиденко Андрій Костянтинович**, ВАТ “Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування ВНДІАЕН”, м. Суми, голова правління - директор.

**Провідна установа** – Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України, м. Харків, відділ аерогідромеханіки.

Захист відбудеться “ 10 ” березня 2005 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.11 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “ 6 ” лютого 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Потетенко О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність досліджень.** Концепцією розвитку енергомашинобудівного комплексу України до 2010 року передбачається забезпечення енергетичних потреб країни, найбільш ефективно використання як власних, так і імпортованих енергетичних ресурсів. Одними із найважливіших напрямків є реконструкція та механічне переозброєння існуючих ГЕС. Енергомашинобудівна галузь України здатна більш ніж на 85% задовольнити вимоги вітчизняної енергетики на сучасне енергообладнання, а також вигравати міжнародні тендери для його експорту.

На сучасному етапі розвитку лопатевих гідравлічних машин, що виробляють енергію, подальше підвищення їх ефективності при досягнутому рівні ККД порядку 93-97% повинне базуватися на розвиненій теорії і методах гідродинамічних розрахунків. Перспективним для цього є метод математичного моделювання робочого процесу у гідравлічній турбіні й поставлення обчислювального експерименту, особливо ефективного у тих випадках, коли він поєднується з аналітичними підходами і фізичним експериментом. Чисельні методи розрахунку течії рідини в елементах проточної частини (ПЧ) гідротурбіни дозволяють на стадії проектування з достатньою для практики точністю розв'язувати такі важливі задачі, як визначення кінематичних параметрів потоку, навантажень і моментів на колонах статора і лопатках напрямного апарата (НА), враховувати взаємний вплив елементів підводу на гідродинамічні параметри і величину втрат енергії та обґрунтовано вибирати варіант проектного рішення. Але дотепер у практиці гідротурбобудування переважно використовуються трудомісткі та дорогі експериментальні дослідження. Тому розроблення та впровадження в практику методів математичного моделювання робочого процесу гідротурбіни є одним із найбільш актуальних напрямків розвитку сучасного гідротурбобудування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі інформатики Сумського державного університету відповідно до договорів між Сумським державним університетом та ВАТ “Турбоатом” (м.Харків) за №80.12.09.98-99 “Розроблення комплексу методик і програмних засобів для оцінки гідродинамічних навантажень на лопатках робочого колеса гідротурбіни осьового типу” і №80.12.09.2001-2002 “Розроблення гідродинамічних методів розрахунку і дослідження робочого процесу для створення робочих колес і проточних частин конкурентоспроможних гідротурбін для виконання експортних замовлень”, згідно наукового напрямку 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 розрахунок, аналіз і удосконалення силових та енергетичних характеристик радіального напрямного апарата гідротурбіни на основі та із застосуванням високоефективних розрахунково-теоретичних методів дослідження.

Відповідно до мети були поставлені і вирішені такі задачі:

- розробити математичну модель та алгоритми розрахунку тривимірної течії рідини у проточній частині радіального НА з урахуванням взаємного впливу елементів підводу;
- провести розрахунково-теоретичні дослідження структури потоку в проточній частині НА;
- виконати розрахунково-теоретичний аналіз розробленої моделі та запропонованих алгоритмів шляхом порівняння результатів обчислень та експерименту, оцінити їх точність та ефективність;
- виконати розрахунок для конкретних гідротурбін гідродинамічних сил і моментів на колонах статора і лопатках НА;
- провести аналіз структури потоку і балансу втрат енергії для різних схем компоновання НА і дати рекомендації щодо подальшого удосконалення гідродинамічних характеристик і компоновання гідротурбінного обладнання.

*Об'єкт дослідження* – процес течії рідини в радіальному напрямному апараті гідротурбін.

*Предмет дослідження* – структура потоку, характер і величина гідродинамічних параметрів потоку на лопатевих системах напрямного апарата.

*Метод дослідження* – математичне моделювання течії рідини в реальній проточній частині НА на основі класичних моделей потенціальної течії ідеальної рідини та за допомогою інтегральних співвідношень теорії аналітичних функцій; чисельна реалізація алгоритмів математичних моделей, порівняння результатів розрахунку основних параметрів потоку з результатами експериментальних досліджень і з розрахунками, виконаними іншими авторами.

**Наукова новизна** дисертаційної роботи:

- розроблена математична модель течії рідини в проточній частині радіального НА, що дозволяє визначити методом гідродинамічних особливостей гідродинамічні показники спіральної камери, колон статора і лопаток НА для реальних режимів роботи гідротурбіни;
- вперше доведена до проведення на стадії проектування широких інженерних досліджень модель тривимірної течії рідини у підводі гідротурбіни для визначення гідродинамічних характеристик потоку у лопатевих системах з урахуванням взаємного впливу елементів;
- розроблено і апробовано ефективний метод двовимірного обтікання лопатевих систем у багатозв'язній області, який суттєво покращує існуючий ітераційний алгоритм Косторного С.Д. і дозволяє однозначно та більш точно виконати розрахунки і оцінювати взаємний вплив елементів. У роботі набув підтвердження і узагальнення двовимірний підхід для розв'язання аналогічної тривимірної задачі на ЕОМ великої потужності;
- запропоновано ефективний алгоритм чисельного розрахунку координат фокуса профілю та впливу геометричних параметрів підводу гідротурбіни на її енергетичні характеристики, що дозволяє цілеспрямовано змінювати варіант проектного рішення проточної частини.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблені і впроваджені програми розрахунків на ЕОМ дозволяють за допомогою чисельного експерименту проводити дослідження з оцінки характеристик гідротурбіни і замінити дорогий фізичний експеримент обчислювальним. Програмне забезпечення було розроблене в середовищі Delphi 5.0 для операційної системи Windows;

- основні результати роботи впроваджені у ВАТ “Турбоатом ” (м. Харків). На основі цієї роботи розраховані і передані замовнику для реалізації варіанти елементів проточної частини гідротурбіни для умов ГЕС Сальто – Гранде (Аргентина) (акт впровадження від 07.10.02);

- у ВАТ “Сумське машинобудівне науково-виробниче об’єднання” заводу ім. М.В.Фрунзе виконуються розрахунки поля швидкостей в проточній частині відцентрових насосів та їх кінематичні характеристики (акт впровадження від 1.12.03);

- наукові і науково-методичні положення, одержані в дисертації, використовуються в навчальному процесі кафедри інформатики СумДУ (акт впровадження від 20.11.03).

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення дисертаційної роботи, винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Поставлення проблеми і задач виконано разом з науковим керівником. Здобувачем особисто виконано чисельну реалізацію розробленої математичної моделі течії рідини в області підводу гідротурбіни; проведено порівняння результатів розрахунків за двовимірною, квазітривимірною і тривимірною моделями; проведено аналіз впливу кожного елемента підводу на загальну структуру потоку та внесені пропозиції щодо раціонального розміщення колон статора і лопаток НА; виконані дослідження з вибору осі повороту лопатки НА з метою зменшення діючого на лопатки поворотного моменту.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати досліджень з дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: 8-й Міжнародній науково-технічній конференції “Прикладні проблеми механіки рідини і газу”, Севастополь, 1999р.; 8-й Міжнародній науковій конференції ім. академіка М.Кравчука, Київ, 2000р.; Міжнародних науково-технічних конференціях “Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання”, Харків, 2000р., 2003р.; Всеукраїнській науковій конференції з прикладної математики та інформатики, Львів, 2001р.; Міждержавній науково-методичній конференції “Проблеми математичного моделювання”, Дніпродзержинськ, 2002р.; щорічних наукових конференціях викладачів, співробітників та аспірантів СумДУ, 1999-2002рр.

**Публікації.** Основний зміст дисертації опубліковано в 10 статтях, з яких 9 статей у фахових виданнях України, 1 у закордонному виданні, а також у 5 тезах доповідей на конференціях.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації - 210 сторінок, у тому

числі 75 рисунків, із яких 26 розміщені на 11 повних сторінках, 4 додатки на 25 сторінках, список використаних джерел із 158 найменувань на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета, наукова проблема і задачі дослідження. Наведені загальна характеристика роботи і основні положення, які відображають наукову новизну роботи та її практичне значення.

**У першому розділі** визначена сфера досліджень, наведений огляд методів математичного моделювання обтікання лопатевих систем і чисельних методів реалізації отриманих моделей. Основну увагу приділено методам моделювання течії нестисливої рідини.

На основі огляду робіт, присвячених потенціальній течії рідини в проточній частині гідравлічних машин і обтіканню лопатевих систем, встановлено, що основним математичним апаратом моделювання течії через решітки профілів є апарат інтегральних рівнянь Фредгольма або сингулярних рівнянь, що дозволяє крайову задачу Діріхле або Неймана розв'язувати методом гідродинамічних особливостей. Чисельна реалізація цього класу рівнянь в переважній більшості робіт виконується зведенням їх до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. У цьому розділі проводиться інформаційний огляд даного напрямку з достатньо детальним аналізом робіт, присвячених панельним методам, які є одним із різновидів методу гідродинамічних особливостей. У країнах далекого зарубіжжя такі методи набули застосування при розв'язуванні аеродинамічних задач для літальних апаратів, у вітчизняній практиці гідромашинобудування вони тільки починають застосовуватися.

**У другому розділі** наведена загальна характеристика математичних моделей і методів розрахунку гідродинамічних параметрів потоку і лопатевих систем підводу. Подаються аналітичні вирази для швидкостей від гідродинамічних особливостей, які використовуються для побудови алгоритмів розв'язання прямих задач. У підрозділі “Загальна класифікація моделей течії рідини і особливості їх чисельної реалізації” розглянуті моделі Нав'є-Стокса, Л.Прандтля, О.Рейнольдса і моделі ідеальної рідини Л.Ейлера. Відзначаючи принципові труднощі чисельної реалізації моделей Нав'є-Стокса, пов'язаних з розв'язанням нелінійних рівнянь в частинних похідних другого порядку і відсутністю потенціалу швидкості, на основі методів класичної гідромеханіки подається аналіз наближених моделей рідини Л.Прандтля і О.Рейнольдса з точки зору адекватності реальним явищам. Оскільки у цих рівняннях руху виникають нові невідомі величини турбулентних напруг, для яких відсутній зв'язок між пульсаційними та осередненими швидкостями, що базуються на фундаментальних законах збереження (маси, кількості руху і енергії), за робочу модель течії рідини у підводі гідравлічної турбіни береться гіпотетична замкнена модель турбулентності С.М.Білоцерковського. В основу цієї моделі турбулентності

покладено умову, що рейнольдсові напруги, пропорційні осередненим значенням невідомих функцій швидкостей, визначаються на першому етапі при розв'язанні повних нестационарних задач у рамках схеми ідеального середовища або ідеального середовища і пограничного шару. В'язкі поправки до розв'язання задачі в ідеальному середовищі необхідно враховувати на другому етапі в другій і третій областях вихрового сліду, використовуючи розщеплені рівняння Рейнольдса для добавок, в яких невідомими є в'язкі добавки швидкостей і тисків. У дисертаційній роботі реалізовано перший етап.

У підрозділі 2.3.1 отримано основне рівняння для розв'язання прямої двовимірної задачі підводу (так звана "квазітривимірна") з використанням способу осереднення всіх параметрів потоку по висоті спіральної камери.

**У третьому розділі** розглянуто поставлення прямої задачі підводу і практичне використання розроблених методів до розрахунку гідродинамічних характеристик елементів підводу реальних гідротурбін, наведено особливості методики розрахунків. Дається математичне обґрунтування прямої задачі підводу для прийнятої у роботі моделі течії рідини. Вона формулюється так: обтічна поверхня тіла  $S$  вважається заданою. Оскільки в елементах підводу течія рідини циркуляційна, то з вихідних кромek колон статора і лопаток НА повинна сходити вихрова пелена  $\sigma(x, y, z)$  вільних вихорів, що прямують до нескінченності по траєкторії ліній тока. Лінія  $L$  сходу пелени вважається відомою (рис.1).

Поле швидкостей  $V(\vec{r}, \tau)$  поза  $S$  і  $\sigma$  вважається потенціальним, а поле тиску у довільній точці простору визначається інтегралом Коші - Лагранжа для рівняння руху Ейлера

$$P(\vec{r}, \tau) = f(\tau) - \rho \frac{\partial \varphi(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{2} V^2(\vec{r}, \tau), \quad (1)$$

в якому  $\varphi(\vec{r}, \tau)$  - потенціал швидкості;  $\vec{V}(\vec{r}, \tau) = \text{grad} \varphi(\vec{r}, \tau)$ ;  $f(\tau)$ -функція, що визначається із граничних умов на нескінченності.

Силова дія рідини на обтічне тіло визначається інтегруванням тиску по поверхні  $S$ :

$$\vec{R} = - \int_S P(\vec{r}_S, \tau) \vec{n}(\vec{r}_S, \tau) dS, \quad (2)$$

де  $\vec{n}(\vec{r}_S, \tau)$  - орт зовнішньої нормалі до  $S$ .

Таким чином, розв'язання прямої задачі в підводі гідротурбіни для нестисливої рідини зводиться до класичної задачі знаходження потенціалу швидкостей  $\varphi(\vec{r}, \tau)$ , що задовольняє рівняння Лапласа і такі граничні умови:

$$1) \text{ на } S - \text{умову непротікання: } \frac{\partial \varphi(\vec{r}_S, \tau)}{\partial n} = \vec{W}^*(\vec{r}_S, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_S, \tau), \quad (3)$$

де  $\vec{W}^*(\vec{r}_S, \tau)$  - швидкість руху рідини в точках поверхні  $S$ ;

2) на нескінченності – умову спаду збурення:

$$\varphi(\vec{r}, \tau) \rightarrow 0; |\nabla\varphi(\vec{r}, \tau) \rightarrow 0|;$$

3) на заданих ділянках кромки поверхні S – умову Чаплигіна – Жуковського;

4) на вільній пелені  $\sigma$  - кінематичну умову сумісності течій і умову відсутності перепаду тисків.

У підрозділі 3.2 даються методика опису геометрії проточної частини підводу і алгоритм чисельної реалізації її на ЕОМ для 2D- (двовимірної) і 3D- (тривимірної) постановок.

Пряма задача для підводу зводиться до інтегрального рівняння (4) для нормальної складової швидкості  $V_n$  на межі тіла сумісно з умовами потенціальності (5) і нерозривності (6):

$$\pi V_n = \left[ \frac{Qx - \Gamma y}{R^2} + \int_L \frac{q(x-\xi) - \gamma(y-\eta)}{r^2} ds + \iint_D \frac{\tilde{q}(x-\xi) - \tilde{\gamma}(y-\eta)}{r^2} d\xi d\eta \right] \sin \alpha - \quad (4)$$

$$- \left[ \frac{Qx - \Gamma y}{R^2} + \int_L \frac{\gamma(x-\xi) + q(y-\eta)}{r^2} ds + \iint_D \frac{\tilde{q}(y-\eta) + \tilde{\gamma}(x-\xi)}{r^2} d\xi d\eta \right] \cos \alpha;$$

$$\int_L \gamma(s) ds + \iint_D \tilde{\gamma}(\xi, \eta) d\xi d\eta + \Gamma = 0; \quad (5)$$

$$\int_L q(s) ds + \iint_D \tilde{q}(\xi, \eta) d\xi d\eta + Q = 0 \quad (6)$$

для двовимірних та квазітривимірних задач.

У рівняннях (4-6)  $\Gamma, Q$ - циркуляція та сток на початку координат;  $q, \gamma$ - гідродинамічні особливості - джерела та вихори, розміщені на плоскому обтічному контурі L;  $\tilde{q}, \tilde{\gamma}$  - фіктивні гідродинамічні особливості, що моделюють шар рідини в області D;  $x, y$  – координати точки, в якій обчислюється швидкість;  $\xi, \eta$  - координати поточної точки.

У тривимірній задачі використано аналогічне (4) рівняння (7) для швидкості:

$$\sum_{i=1}^{N_s} W_{nSi}(\vec{r}_{0i}, \tau) \gamma_{Si} + \sum_{i=1}^{N_\sigma} W_{n\sigma i}(\vec{r}_{0i}, \tau) \gamma_{\sigma i} = 4\pi W_n^*(\vec{r}_{0i}, \tau). \quad (7)$$

Тут позначено  $W_{nS(\sigma)i}(\vec{r}_{0i}, \tau)$  - нормальні швидкості у розрахункових точках, що наведені просторовою гідродинамічною особливістю;  $N_s$  і  $N_\sigma$  - загальна кількість многокутників на S і на  $\sigma$  відповідно.

Для вихрової рамки швидкості  $\vec{W}_{S(\sigma)i}(\vec{r}, \tau)$  обчислюються за законом Біо - Савара

$$\vec{W}_{S(\sigma)i}(\vec{r}, \tau) = \int_{\Pi_{S(\sigma)i}} \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3}. \quad (8)$$

У формулі (8)  $S_i$  (або  $\sigma_i$ ) – елемент поверхні S ( $\sigma$ ) всередині відповідної вихрової рамки, а  $\Pi_{S(\sigma)i}$  - її периметр (рис.1).

Інтеграли у (8) по прямолінійних відрізках (сторонах рамки) обчислюються за формулами (9)

$$V_{yx} = ba_x, \quad V_{zy} = ba_y, \quad V_{zx} = ba_z, \quad (9)$$



$$\begin{aligned} \text{де } a_x &= (y - y_1)(z_2 - z_1) - (z - z_1)(y_2 - y_1), \\ a_y &= (z - z_1)(x_2 - x_1) - (x - x_1)(z_2 - z_1), \\ a_z &= (x - x_1)(y_2 - y_1) - (y - y_1)(x_2 - x_1), \\ a^2 &= a_x^2 + a_y^2 + a_z^2, \end{aligned}$$

$$b = \frac{1}{a^2} \left[ \frac{(x - x_1)(x_2 - x_1) + (y - y_1)(y_2 - y_1) + (z - z_1)(z_2 - z_1)}{r_{01}} - \frac{(x - x_2)(x_2 - x_1) + (y - y_2)(y_2 - y_1) + (z - z_2)(z_2 - z_1)}{r_{02}} \right],$$

$$r_{01} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}, \quad r_{02} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2},$$

$$\begin{cases} x_1, y_1, z_1, \\ x_2, y_2, z_2 \end{cases} \text{ — координати початку і кінця вихрового відрізка.}$$

Гранична умова непротікання (3) виконується для розрахункових точок  $T_i$ , що визначаються радіус-векторами  $\vec{r}_{0i} (i = 1, 2, \dots, N_S)$  (позначені хрестиками на рис. 1), розташованих в центрі рамки.

Якщо ввести матриці наведених швидкостей

$$W_S = \{W_{nSi}(\vec{r}_{0i}, \tau)\} \quad i = \overline{1, N_S}; \quad W_\sigma = \{W_{n\sigma i}(\vec{r}_{0i}, \tau)\} \quad i = \overline{1, N_\sigma} \quad (10)$$

і вектори

$$\Gamma_S = \begin{pmatrix} \gamma_{S1} \\ \gamma_{S2} \\ \dots \\ \gamma_{SN_S} \end{pmatrix}; \quad \Gamma_\sigma = \begin{pmatrix} \gamma_{\sigma 1} \\ \gamma_{\sigma 2} \\ \dots \\ \gamma_{\sigma N_\sigma} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 4\pi W_n^*(\vec{r}_{01}, \tau) \\ 4\pi W_n^*(\vec{r}_{02}, \tau) \\ \dots \\ 4\pi W_n^*(\vec{r}_{0N_\sigma}, \tau) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

тоді (7) запишеться у матричному вигляді

$$W_S \Gamma_S + W_\sigma \Gamma_\sigma = B, \quad (12)$$

або в еквівалентному вигляді

$$W_S \Gamma_S = B - W_\sigma \Gamma_\sigma. \quad (13)$$

Співвідношення (13) розглядається як система лінійних алгебраїчних рівнянь і використовується для визначення циркуляцій  $\gamma_{S1}, \gamma_{S2}, \dots, \gamma_{SN_S}$  на S. Невиродженість матриці  $W_S$  для довільного розбиття S та виконання умови Чаплигіна-Жуковського, що забезпечує єдиний розв'язок системи, доведені А.В.Двораком. Якщо  $\sigma$  сходиться з поверхні S, відповідна циркуляція  $\Gamma_{\sigma\mu}$  буде дорівнювати різниці між циркуляціями відповідних вихрових рамок, що приєднуються до лінії сходу (рис. 1), значення яких беруться з попереднього кроку розрахунків:

$$\Gamma_{\sigma\mu} = \Gamma_{S\nu 1} - \Gamma_{S\nu 2}. \quad (14)$$

При сході  $\sigma$  з кромки S циркуляції  $\Gamma_{\sigma_i}$  присвоюється значення відповідної  $\Gamma_{\sigma_v}$ , що також отримується з попереднього кроку. Для стаціонарних задач, коли ітераційний процес збігається, вихрові відрізки на кромці ( $\Gamma_{\sigma_v}$ ,  $\Gamma_{\sigma_i}$  на рис. 1) взаємно компенсують один одного. Тоді найближчою до кромки буде розрахункова точка, що і відповідає умові Чаплигіна-Жуковського. Граничні умови на пелені  $\sigma$  задовольняються тим, що вихрові відрізки переміщуються із швидкістю частинок рідини.

Запропонований у роботі спосіб удосконалення методу розв'язання плоскої прямої задачі відрізняється від методу С.М.Білоцерковського тим, що безперервно розподілена по контуру профілю гідродинамічна особливість на елементарній ділянці  $\Delta s$  вважається постійною, тобто розглядається панельна особливість, а не дискретна. У цьому випадку в особливій точці граничне значення нормальної компоненти функції швидкості  $V_n$  дорівнює  $0.5q$  у разі моделювання контура шаром джерел інтенсивності  $q$ . Цей спосіб обчислення складової швидкості в особливій точці від гідродинамічної особливості дозволяє підвищити точність розв'язання прямої задачі при збереженні загальної кількості розрахункових точок.

У тривимірній задачі за гідродинамічну особливість взята замкнена рамка вихрових відрізків постійної інтенсивності, що збудує таке саме поле швидкостей, як неперервне розподілення диполів джерел, розміщених всередині поверхні, що охоплюється рамкою.

Результати розв'язання прямих 2D- і 3D- задач і програми їх чисельної реалізації протестовані шляхом порівняння з точними аналітичними розв'язками для канонічних областей, розв'язками за програмою PANEL для профілю NASA (розробленою фірмою МББ), результатами експериментальних досліджень, виконаних на ВАТ "Турбоатом". Порівняння результатів розв'язання за розробленими програмами (рис. 2) виявилось у межах допустимої точності, прийнятої на заводі при проектуванні гідротурбін.

Проточна частина досліджуваної моделі, характеризується такими основними геометричними параметрами: спіральна камера трапецеїдального поперечного перерізу із кутом обхвату  $\varphi = 187.5^\circ$ , висота НА  $b_0 = 0.375D_1$  ( $D_1$  - діаметр робочого колеса), діаметр розміщення осі повороту лопаток НА  $D_0 = 1.25D_1$ , кількість колон статора-16 із зубом спіралі, кількість лопаток НА  $Z = 32$ , розміщених проти колон статора. У вхідному перерізі спіральної камери встановлено 2 бички.

У підрозділах 3.5, 3.7 даного розділу наведені результати розрахунку кінематичних параметрів потоку в підводі, окремі приклади яких подані на рис. 3 і рис. 4 з використанням 2D- і 3D- моделей. Зображені на рис. 3 графіки залежності кінематичного параметра - кута потоку  $\delta$  (кут між вектором швидкості і радіальним напрямом) від кутової координати істотно відрізняються між собою. Це пояснюється нерівномірною структурою потоку в проточній частині,

яка залежить від розміщення лопатки НА проти колон статора або в аеродинамічному сліді останньої. Характер зміни  $\delta$  за лопатками НА на радіусі  $R=265\text{мм}$  (рис.4) відображає взаємний вплив на структуру потоку елементів підводу. Неосесиметричний потік, що формується спіральною камерою за лопатками НА, значно наближається до осесиметричного та зберігає при цьому періодичну нерівномірність, більш значну при більших відкриттях.

Розрахункові моментні характеристики досліджуваної моделі гідротурбіни у вигляді розподілу безрозмірного коефіцієнта моменту повороту лопатки  $C_{m0}$  на лопатках подані на рис.5. Вони дозволяють оцінити вплив 2D- і 3D- моделей на значення  $C_{m0}$  і залежність величини моментів від режиму роботи турбіни та від розміщення лопатки в спіральній камері (проти колони чи між колонами, біля зуба спіралі, в спіральній камері тощо). В досліджуваній моделі парні лопатки розміщені між колонами статора, лопатки №1, №30, №31, №32 розміщені біля зуба спіралі, а № 14-17 – в спіральній частині камери проти вхідного перерізу.

У підрозділі 3.6 наведені алгоритм розв'язання задачі визначення координат фокуса профілю лопатки НА і приклад розрахунку моментних характеристик для варіанта досліджуваної проточної частини ГЕС (рис. 6). Отримані результати переконливо підтверджують доцільність вибору осі повороту лопатки у фокусі. З поданих на рис.6 графіків зміни коефіцієнта  $C_{m0}$  на лопатках НА для різних варіантів координат осі повороту лопатки бачимо, що за умови поєднання осі повороту з координатами фокуса профілю  $C_{m0}$  змінюється в межах  $(-0.1 \div -0.04)$ . В іншому варіанті: коли вісь повороту зсунута відносно фокуса до вихідної кромки (варіант, що використовується на практиці),  $C_{m0}$  змінюється в межах  $(-0.25 \div 0.26)$ . При розрахунках кути атаки на лопатці змінювалися від  $15^\circ$  до  $-45^\circ$ . Однак треба мати на увазі, що розрахункові кути атаки для всього діапазону режимів роботи турбіни змінюються від  $50^\circ$  до  $-45^\circ$ , і тому, вірогідно, прийнята модель течії рідини (безвідривне обтікання) не буде реалізована на окремих режимах. Для остаточного вирішення питання вибору координат осі повороту лопаток НА потрібно виконати додаткові дослідження з використанням моделі відривного обтікання.

**У четвертому розділі** наведені результати розрахунку втрат енергії в елементах підводу гідротурбіни з використанням розроблених програм.

За основу практичної методики визначення втрат енергії взятий підхід, прийнятий в практиці гідротурбобудування і опробований В.О.Количевим. Окремі результати розрахунку коефіцієнта опору НА для ГЕС Сальта-Гранде показані на рис. 7 і рис. 8.

Характер зміни коефіцієнта втрат енергії на лопатках з рис.7 дозволяє зробити висновок, що на лопатках №14-18 в спіральній частині проти вхідного перерізу і на лопатках №26-31 біля зуба спіралі на оптимальному режимі  $a_0 = 32$  сумарні втрати енергії більші, ніж на інших лопатках, за рахунок ударних втрат.

Аналіз коефіцієнта втрат енергії для всього діапазону режимів роботи турбіни дозволяє визначити, що режим роботи при  $a_0 = 30 - 32$  є оптимальним для розглянутого варіанта підводу (рис.8).

У додатку наведені: 1) керівництво оператора – користувача програмою розрахунку кінематичних, силових, моментних і енергетичних характеристик гідротурбіни з описанням правил підготовки вихідних даних і конкретним прикладом її виконання і обробки результатів розрахунку; 2) акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в ВАТ “Турбоатом” м. Харкова; 3) акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в СКБ хімобудівництва ВАТ “Сумське машинобудівне науково-виробниче об’єднання ім. М.В.Фрунзе”; 4) акт про впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі кафедри інформатики механіко-математичного факультету СумДУ для спеціальності 7.080202 “Прикладна математика”.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню науково-практичної задачі розрахунку, аналізу та удосконалення силових і енергетичних характеристик радіального напрямного апарата гідротурбіни на основі методів математичного моделювання течії рідини.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Вперше розв’язана пряма задача тривимірної течії рідини у підводі гідротурбіни з урахуванням взаємного впливу елементів, яка більш повно відображує реальні процеси в гідротурбіні. Чисельна реалізація алгоритмів виконується методом гідродинамічних особливостей.

2. Розроблено комплекс прикладних програм для проведення чисельного експерименту по розрахунку гідродинамічних навантажень та полей швидкості в підводі з урахуванням взаємного впливу елементів. На підставі виконаних розрахунків проведено аналіз розподілення гідродинамічних навантажень на кожному елементі підводу в широкому діапазоні режимів його роботи.

3. Систематичними дослідженнями розрахунку потоку та його параметрів у ПЧ підводу підтверджені тривимірний характер течії рідини і можливість заміни в практичних задачах тривимірної моделі квазітривимірною, і навіть двовимірною.

4. Використано метод розв’язання прямої 2D- задачі в багатозв’язній області за допомогою панельних гідродинамічних особливостей і доведено, що він більш ефективний, ніж метод дискретних вихорів, оскільки дозволяє отримати необхідну точність з меншим числом розрахункових точок.

5. Отримані параметри потоку порівняні з результатами експерименту та даними, отриманими іншими авторами. Також проведено тестування шляхом порівняння з точними аналітичними розв’язками для канонічних областей. Все це свідчить про ефективність

запропонованих у роботі методів математичного моделювання течії рідини і їх чисельної реалізації. На конкретних прикладах доведена можливість заміни фізичного експерименту обчислювальним.

6. У роботі запропоновано і перевірено розрахунками спосіб вибору осі повороту лопатки НА шляхом розміщення її в фокусі профілю. Це забезпечує в реальних умовах відсутності осьової симетрії потоку перед НА більш надійну роботу турбіни завдяки рівномірному розподілу моменту повороту на кожній лопатці НА.

7. У результаті аналізу структури потоку в підводі систематизовані і узагальнені дані про характер розподілу кінематичних параметрів по висоті і в коловому напрямку НА. Отримані результати взяті за вихідні дані для розрахунку втрат енергії в елементах підводу. Отримані графіки розподілення коефіцієнта опору на кожному елементі підводу відображають в узагальненому вигляді вплив спіральної камери, статора і НА на характеристику опору підводу. Ці параметри можуть бути використані для вибору основних геометричних параметрів ПЧ на початкових етапах проектування і при виборі проектного рішення за компонуванням елементів проточної частини.

8. 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 хімообладнання ВАТ “Сумське машинобудівне науково-виробниче об’єднання ім. М.В.Фрунзе”.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Мартынова Н.С. Модели течения жидкости в радиальном направляющем аппарате гидротурбины и особенности их численной реализации // Вісник Сумського державного університету.- Суми: СумДУ.- 2001.- №3(24)- 4(25).- С.163-169.

2. 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(24)- 4(25).- С.169-176.

Здобувачем проведений розрахунок 3D- потоку і отримані характеристики моменту лопаток у проточній частині НА

3. Косторной С.Д., Борозенец Н.С., Мартинова Н.С., Хатунцев А.Ю. Модель осередненого плинину ідеальної рідини в напрямному апараті гідротурбіни // Вісник Сумського державного аграрного університету.- Суми: СДАУ- 2001.-№6.- С.41-48.

Методом осереднення параметрів потоку по висоті НА здобувачем одержана розрахункова модель квазітривимірного витікання ідеальної рідини і алгоритм її чисельної реалізації на ЕОМ.

4. Косторной С.Д., Борозенец Н.С., Мартинова Н.С., Хатунцев А.Ю. Модель тривимірного плинну ідеальної рідини в напрямному апараті гідротурбіни // Вісник Сумського державного аграрного університету.- Суми: СДАУ.- 2001.- №6.- С.48-53.

Здобувачем розглянуті розв'язки моделей ідеальної рідини та пограничного шару стосовно напружень Рейнольдса.

5. Хатунцев А.Ю., Мартинова Н.С., Косторной С.Д. Розв'язування задачі обтікання в плоскому потоці методом гідродинамічних особливостей // Вісник Сумського національного аграрного університету.- Суми: СНАУ.- 2002.- Випуск 9. - С.17-20.

Здобувачем проведено розв'язання задачі обтікання тіла методом панельних гідродинамічних особливостей і тестування програми шляхом порівняння результатів розрахунку з результатами інших авторів.

6. Мартинова Н.С. Численное исследование силовых характеристик направляющего аппарата гидротурбины // Вісник Сумського державного університету.- Суми: СумДУ.- 2003.- №3(49).- С.57-62.

7. Хатунцев А.Ю., Мартинова Н.С., Косторной С.Д. Численное моделирование влияния геометрических параметров подвода гидротурбины на ее энергетические показатели // Вестник Национального технического университета "ХПИ".- Харьков: НТУ "ХПИ".- 2003.- №5.- С.98-103.

Здобувачем виконано розрахунок і аналіз енергетичних показників напрямного апарата гідротурбіни.

8. Khatunsev A., Kostornoy S., Lubchak VI., Martinova N. The Numerical Modelling of Influence of Geometric Parameters of the Hydraulic Turbine's Supply on its Hydrodynamic Performances // Buletinul Universitatii Petrol-Gaze din Ploiesti.- Volum LV.- Seria Tehnica.- Nr. 1/2003.- P.107-110.

Здобувачем виконано аналіз впливу елементів підводу на енергетичні показники гідротурбіни.

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

Здобувачем виконано розрахунок і аналіз енергетичних показників напрямного апарата гідротурбіни.

10. Мартинова Н.С. Розрахунок кінематичних параметрів потоку і моментних характеристик лопаток напрямного апарата гідротурбіни на основі 2D- і 3D- моделі ідеальної рідини // Вісник Сумського національного аграрного університету.- Суми:- СНАУ.- 2003.- Випуск 10.- С.253-259.

## АНОТАЦІЯ

Мартінова Н.С. “Математичне моделювання і розрахунків силових і енергетичних характеристик підводу вертикальної гідротурбіни осевого типу при проектуванні її проточної частини”. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.- Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2005р.

Дисертація присвячена розрахунку силових і енергетичних характеристик підводу вертикальної гідротурбіни осевого типу на основі математичного моделювання течії рідини для створення варіанта проточної частини, що відповідає рівневі світових досягнень за енергетичними і експлуатаційними показниками.

На основі аналізу робіт, присвячених моделюванню течії рідини в проточній частині, взята 3D- модель руху ідеальної рідини, що найбільш повно забезпечує досягнення поставленої мети. Чисельна реалізація практичних задач розрахунку поля швидкостей у проточній частині підводу з урахуванням взаємного впливу елементів здійснена на ЕОМ методом гідродинамічних особливостей. Тестування програм виконане шляхом порівняння з результатами задач, що мають точний аналітичний розв’язок, виконаними іншими авторами, а також результатами експериментальних досліджень.

Розрахунок коефіцієнта опору підводу виконується на основі підходу, запропонованого Количевим В.О., шляхом поділу загальних втрат енергії на складові: тертя, кромкові, ударні, кінцеві. Запропонована методика реалізована у вигляді обчислювальної програми для ЕОМ.

Ключові слова: гідротурбіна, підвід, кінематичні параметри, силові навантаження, момент повороту, втрати енергії.

## АННОТАЦИЯ

Мартынова Н.С. “Математическое моделирование и расчет силовых и энергетических характеристик подвода вертикальной гидротурбины осевого типа при проектировании ее проточной части”. – 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, 2005г.

Диссертация посвящена расчету силовых и энергетических характеристик подвода вертикальной гидротурбины осевого типа на основе математического моделирования течения жидкости с целью создания варианта проточной части, отвечающего уровню мировых достижений по энергетическим и эксплуатационным показателям.

Дальнейшее совершенствование ПЧ гидротурбины при достигнутом высоком уровне энергетических показателей порядка  $\eta = 0.97$  невозможно без совместных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований рабочего процесса, включающих изучение таких сложных явлений, как обтекание лопастных систем неравномерным потоком, учет взаимного влияния элементов подвода. Применение современных методов расчета, которые базируются на трехмерных моделях течения, расширяет возможности получения необходимого проектного решения, снижает его себестоимость, сокращает срок проектирования, создает наиболее благоприятные условия надежной эксплуатации гидротурбины.

В диссертационной работе проведены исследования и разработан метод расчета гидродинамических характеристик элементов подвода и потока в случаях стационарного безотрывного течения жидкости в ПЧ с учетом взаимного влияния элементов для 2D- и 3D-моделей течения. Численная реализация практической задачи расчета поля скоростей в проточной части подвода с учетом взаимного влияния элементов осуществлена на ЭВМ методом гидродинамических особенностей. Предложенный в работе способ решения прямой задачи подвода отличается от метода С.М.Белоцерковского тем, что непрерывно распределенная по контуру профиля гидродинамическая особенность на элементарном участке считается постоянной (т.е. рассматривается панельная особенность, а не дискретная). Используемый в работе метод более эффективен, чем метод дискретных вихрей, так как позволяет получить требуемую точность с меньшим числом расчетных точек.

Тестирование программ выполнено путем сравнения с результатами, выполненными другими авторами, и результатами экспериментальных исследований и показывает удовлетворительное согласование результатов.

В работе предложен и проверен расчетом способ выбора оси поворота лопатки НА посредством совмещения ее с фокусом профиля. Он позволит обеспечить в реальных условиях отсутствия осевой симметрии потока перед НА более надежную работу турбины благодаря равномерному распределению момента поворота на каждой лопатке.

Расчет коэффициента сопротивления подвода выполняется на основе подхода, предложенного Колычевым В.А., путем разделения общих потерь энергии на составляющие: трения, кромочные, ударные, концевые. На основе выполненных расчетов был сделан баланс распределения коэффициентов составляющих потерь энергии на колоннах статора и лопатках НА и проведен анализ влияния каждого элемента подвода на характеристику сопротивления подвода.

Ключевые слова: гидротурбина, подвод, кинематические параметры, силовые нагрузки, моментные характеристики, потери энергии.



**SUMMARY**

Martynova N.S. Mathematical modeling and prediction of power characteristics of the intake of an axial-flow vertical hydroturbine at designing of its flow passage. – Manuscript.

Dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical science on the speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydraulic and pneumatic units.- National Kharkiv University “Kharkiv Polytechnical Institution”, Kharkiv, 2005.

The thesis is devoted to prediction of power characteristics of the intake of an axial-flow vertical hydroturbine on the basis of mathematical modeling of fluid flow with the purpose of creation of the flow passage of world wide performance level. The research was conducted using a 3D model of non-stationary flow of ideal fluid.

The algorithm for numerical computation of velocity field in the flow passage of the intake, taking into account mutual influence of elements, was based on the method of discrete hydrodynamic singularities and implemented as a computer software tool. The software tool was tested by comparing with known analytical and experimental results.

The resistance factor of the intake was computed basing upon approach suggested by Kolychev V.A., by dividing the total energy losses into components: friction, edge, impact, tail losses. This hypothesis was also implemented as a computer software tool.

Keywords: hydraulic turbine, kinematical parameters, power loads, moment of turning, energy losses.

Підп. до друку 02.02.2005р.

Наклад 100 прим.

Замовлення №

Формат 60x90/16.

Обл. – вид. арк. 0,8.

Ум. друк. арк. 0,9.

Вид-во СумДУ. Р.с. №34 від 11.04.2000р.

40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

Друкарня СумДУ. 40007, м.Суми, вул. Римського-Корсакова, 2