

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Кухтенков Юрій Михайлович

УДК 621.224.24

**ПРОГНОЗУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ
У РАДІАЛЬНО-ОСЬОВИХ ГІДРОТУРБИНАХ
ТА ШЛЯХИ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гідравлічних машин Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Зав’ялов Павло Сергійович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри гідравлічних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Косторной Сергій Дмитрович,
Сумський державний аграрний університет,
професор кафедри вищої математики

кандидат технічних наук
Жиленко Валерій Дмитрович,
Східне відділення НВЦ „Техдіагаз” (м. Харків),
начальник відділення

Захист відбудеться “15” травня 2008 р. о 12.00 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 в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “29” березня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вібраційний стан у гідротурбінах у значному ступені залежить від пульсацій тиску, які обумовлені рухом вихрових джгутів за робочими колесами у відсмоктуючій трубі. Експериментально встановлено, що у гідротурбінах на режимах недовантаження та форсування потужності трапляється наявність одного або декількох вихрових джгутів. Силова взаємодія вихорів з елементами проточного тракту може призвести до серйозних аварій. В більшості ці вихрові джгути мають складну просторову гвинтову форму, тому для розрахунку пульсацій тиску треба використовувати просторові математичні моделі.

Технічні показники сучасних гідротурбін достатньо високі, тому для їхнього подальшого поліпшення треба удосконалювати методики розрахунку пульсаційних характеристик гідротурбіни, які характеризують рівень нестационарності гідротурбіни.

В зв'язку зі складністю задачі доцільно використовувати блочну структуру математичної моделі, що забезпечує єдність та повноту опису робочого процесу. Математичні моделі для розрахунків низькочастотних пульсацій тиску повинні бути досить простими і в той же час, достатньо повно відображати закономірності робочого процесу, забезпечуючи необхідну точність розрахунків амплітуд та частот пульсацій тиску у проточній частині гідротурбін.

Застосування просторових моделей у розрахунках джгутових пульсацій тиску з використанням ЕОМ вказує на необхідність подальшого удосконалення існуючих та створення нових методик.

Таким чином, прогнозування пульсаційних характеристик шляхом створення нових методик їх розрахунків на основі розроблення просторових математичних моделей руху вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі дозволяє уточнити розрахунки на динамічну міцність, збільшити надійність, довговічність і точніше вказати зону експлуатаційних режимів роботи гідротурбіни. Це є актуальним науково-практичним завданням, рішення якого й присвячена дана робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі гідравлічних машин НТУ «ХП». У дисертаційній роботі використані результати, які отримані здобувачем при виконанні держбюджетних тем МОН України: "Математичне моделювання робочого процесу гідротурбін з метою розробки нових зразків для України, включаючи реконструкцію ГЕС, малу енергетику, і на експорт" (1997-1999 р.р.), "Математичне моделювання просторових потоків і робочого процесу гідротурбін" (2000-2002 р.р., ДР №0100U001698) і „Визначення характерних закономірностей робочого процесу у високонапірних гідротурбінах з широким діапазоном експлуатаційних напорів та витрат” (2003-2005 р.р., ДР №0103U001504).

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є прогнозування пульсаційних характеристик гідротурбін на основі просторової математичної

моделі руху вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі і зниження рівня джгутових пульсацій тиску за рахунок застосування конструктивних засобів.

Відповідно до мети були поставлені такі завдання:

- розробка просторової математичної моделі для розрахунку низькочастотних пульсацій тиску з урахуванням довільного числа вихрових джгутів і додаткового осесиметричного потоку за робочим колесом гідротурбіни у відсмоктуючій трубі і виконання чисельної реалізації задачі;
- розробка методики побудування характеристик пульсацій тиску від вихрових джгутів за робочим колесом радіально-осьової (РО) гідротурбіни та порівняння результатів розрахунків з даними проведених фізичних експериментів;
- розробка алгоритму і програм розрахунків кінематичних параметрів, які характеризують вихрові джгути за робочими колесами гідротурбін;
- визначення залежностей геометричних параметрів вихрових джгутів від режимів роботи гідротурбіни на основі проведених зондових і візуальних експериментальних досліджень для одержання апроксимаційних залежностей при прогнозуванні пульсаційних характеристик;
- розробка практичних заходів, які дозволять зменшити пульсації тиску у відсмоктуючій трубі гідротурбіни, і як наслідок, покращання її енергетичних характеристик.

Об'єкт дослідження – низькочастотні процеси пульсацій тисків у відсмоктуючій трубі гідротурбіни, що обумовлені рухом вихрових джгутів.

Предмет дослідження – характеристики пульсацій тиску і залежності геометричних та кінематичних параметрів вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі від режимів роботи гідротурбіни.

Методи дослідження. Основними методами дослідження були математичне і фізичне моделювання, які дозволили прогнозувати джгутові пульсації тиску у відсмоктуючій трубі на базі моделей течії ідеальної рідини. Експериментальний метод дослідження застосовувався при визначенні амплітуд і частот пульсацій тиску від вихрових джгутів і їх геометричних та кінематичних параметрів для прогнозування джгутових пульсацій тиску у відсмоктуючих трубах гідротурбін.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- розроблена математична модель розрахунку джгутових пульсацій тиску з урахуванням довільного числа вихрових джгутів та додаткового осесиметричного потоку у відсмоктуючій трубі РО гідротурбіни, що дозволяє точніше прогнозувати пульсаційні характеристики;
- запропоновано для чисельної реалізації задачі по прогнозуванню пульсацій тиску визначати напруженість вихрової поверхні, що моделює стінку відсмоктуючої труби, у вигляді заданого ряду Фур'є з невідомими коефіцієнтами із рівняння Фредгольма, а інтенсивність вихрових джгутів – з осесиметричної кромкової задачі;
- визначені закономірності зміння основних геометричних параметрів вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі у широкому діапазоні режимів роботи гідротурбіни і одержані апроксимаційні залежності для прогнозування пульсаційних характеристик на основі проведених експериментів на модельних

гідравлічних турбінах.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень, що розглянуті у дисертаційній роботі, використовуються в галузі енергетичного машинобудування:

- розроблена методика, що дозволяє розраховувати й аналізувати пульсаційні характеристики у РО гідротурбінах; порівняння прогнозних характеристик з результатами модельних і натурних експериментів свідчить про їх задовільне узгодження – це дає можливість точніше визначити зону експлуатації гідротурбіни і використовувати ці дані у розрахунках на міцність елементів гідроагрегата;
- розроблена методика побудови амплітудної й частотної характеристик пульсацій тиску від декількох вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі РО гідротурбіни з урахуванням границь переходу, що дозволяє оцінити рівень нестационарності у широкому діапазоні режимів роботи;
- на основі експериментів у модельних гідротурбінах на напори 100-300 метрів визначені апроксимаційні залежності геометричних параметрів вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі від режимів роботи, що дає можливість виконувати розрахунки пульсацій тиску;
- застосування різних практичних заходів – подовженого обтічника робочого колеса, різних конструкцій РО робочих коліс з поворотними елементами, впуску повітря під робоче колесо – дозволяє значно зменшити пульсації тиску у відсмоктуючій трубі гідротурбіни.

Результати роботи використані при розробці ряду гідротурбін ВАТ „Турбоатом” (м. Харків) на напори 100-300 метрів, а також у навчальному процесі на кафедрі гідравлічних машин НТУ «ХПІ» в дисциплінах “Нестационарні явища у лопатевих гідромашинах” і „Гідротурбіни”.

Особистий внесок здобувача. Результати проведених досліджень отримано здобувачем самостійно, серед них: розробка математичної моделі розрахунку джгутових пульсацій тиску від довільного числа вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі гідротурбіни і здійснена її чисельна реалізація; на основі апроксимації експериментальних даних визначені залежності основних геометричних параметрів вихрових джгутів від режиму роботи у відсмоктуючій трубі гідротурбіни; проведений значний обсяг розрахункових і експериментальних досліджень пульсацій тиску у гідротурбінах РО115, РО230, РО310 на стендах ВАТ „Турбоатом” та натурних гідротурбінах. Постановка наукової проблеми і задач, їх аналіз виконано спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях та семінарах, у тому числі на: науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників і аспірантів НТУ “ХПІ” (м. Харків, 2001 – 2007 р.р.); міжнародній науково-технічній конференції присвяченій 125-річчю з дня народження Проскури Г.Ф. (м. Харків, 2001 р.); міжнародній науково-технічній конференції "Удосконалення турбоустановок засобами математичного й фізичного моделювання" (м. Зміїв, 2002 р.); X-XV

міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2002 – 2007 р.р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 робіт, серед них: 6 – у спеціалізованих фахових виданнях ВАК України, 2 – патенти України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, 9 додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 165 сторінок, з них: 54 ілюстрації за текстом, 13 ілюстрацій на 5 окремих сторінках, 1 таблиця на 1 окремій сторінці, 9 додатків на 17 сторінках, 113 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** показані суть і стан досліджуваної проблеми, обґрунтована актуальність роботи і сформульовані основні задачі дослідження, дається мета роботи, її наукова новизна і шляхи практичного використання результатів.

У **першому розділі** наведений огляд літератури по темі дослідження та тенденції застосування сучасних методів розрахунку пульсаційних характеристик у РО гідротурбінах. В роботі проводиться огляд сучасних методів розрахунку пульсацій тиску у гідротурбінах з точки зору їхнього застосування при проектуванні гідротурбін – досліджений вплив різних параметрів вихрових джгутів на пульсаційні характеристики гідротурбін.

Виконаний аналіз показав, що поряд з двомірними моделями, необхідна розробка просторових моделей пульсацій тиску, які більш адекватно відображують властивості потоку, є досить надійними і можуть служити основою при прогнозуванні пульсаційних характеристик гідротурбін.

Теоретичні та численні експериментальні дослідження пульсацій тиску у гідротурбінах наведені у роботах Віссаріонова В.І., Владиславлева Л.А., Веремеєнка І.С., Вапніка Б.К., Гутовського Е.В., Заворуєва В.П., Зав'ялова П.С., Зубарева М.І., Іванченка І.П., Ісаєва Ю.М., Косторного С.Д., Квятковської Е.В., Кривченка Г.І., Маргуліса Л.Я., Потетенка О.В., Саркисової М.Ф., Сотнікова А.А., Хатунцева А.Ю., Дорфлера П., Куботи Т., Кляйна Д., Кустона М., Рейнганса У., Рупрехта А., Скотака А., Фелвея Г., Хосої Я. та ін.

У роботах Бондаренка А.В., Григор'єва В.І., Пазі Л.Г., Мураками М., Нехлеби М., Фанеллі М., Філіберта Р. розглядається широке коло питань, які пов'язані з моделюванням процесів низькочастотних джгутових пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі, методикою експерименту, способами обробки дослідних даних та аналізом пульсаційних характеристик гідротурбін.

Більшість математичних моделей побудовані на розгляді поля швидкостей, яке створюється вихорами різних конфігурацій і обмежено твердими границями. Але, значна кількість припущень накладає значні обмеження на можливість використання моделей і потребує подальшої їх доробки.

У дисертаційній роботі на основі узагальнення існуючих підходів і проведених експериментальних досліджень ставилась та була вирішена задача розробки просторової математичної моделі для прогнозування низькочастотних

пульсацій тиску від руху довільного числа вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі, а також розроблена методика розрахунку і побудови пульсаційних характеристик.

В другому розділі наведена просторова математична модель розрахунку пульсацій тиску від довільного числа фізичних (основних) вихрових джгутів рівної інтенсивності у циліндричній відсмоктуючій трубі [1-3].

Стінка відсмоктуючої труби, як і у роботі д.т.н. Григор'єва В.І., моделюється вихровою поверхнею, яка складається з нескінченно великого числа тонких вихрових шнурів змінної інтенсивності з кроком рівним кроку фізичних вихрових джгутів, які мають форму гвинтової спіралі (рис.1б). Задача розглядається у квазістаціонарній постановці, рідина нев'язка. Поток поза вихором при визначенні індуцьованих швидкостей приймається потенціальним. Урахований також додатковий осесиметричний потік, що обумовлений проходженням рідини через робоче колесо. Задача зводиться до пошуку швидкостей у будь-якій точці відсмоктуючої труби.

Сумарна швидкість у відсмоктуючій трубі записується

$$\vec{V} = \sum_{s=1}^{z_{ж}} \vec{V}_{жs} + \vec{V}_{п} + \vec{V}_{q}, \quad (1)$$

де $\vec{V}_{жs}$ – швидкості, що індуцьовані фізичними вихровими джгутами, $\vec{V}_{п}$ – швидкість, що індуцьована вихровою поверхнею, \vec{V}_{q} – швидкість додаткового осесиметричного потоку через робоче колесо, $z_{ж}$ – число вихрових джгутів, s – порядковий номер фізичних вихрових джгутів, $1 \leq s \leq z_{ж}$.

Складові швидкості, що індуцьовані вихровими джгутами, визначаються з формул, які наведені у роботі Кочіна М.Є. у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{\Gamma}{4\pi L} \int \left(\frac{\eta - y}{\rho^3} d\zeta - \frac{\zeta - z}{\rho^3} d\eta \right) \\ V_y &= \frac{\Gamma}{4\pi L} \int \left(\frac{\zeta - z}{\rho^3} d\xi - \frac{\xi - x}{\rho^3} d\zeta \right) \\ V_z &= \frac{\Gamma}{4\pi L} \int \left(\frac{\xi - x}{\rho^3} d\eta - \frac{\eta - y}{\rho^3} d\xi \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де Γ – інтенсивність вихрової лінії, L – довжина вихрової лінії, а ξ, η, ζ і x, y, z – декартові координати точки M на вихорі і довільної точки N відповідно.

Враховуючи, що форма вихрового джгута у відсмоктуючій трубі з деяким наближенням приймається у вигляді гвинтоподібної спіралі, то можна записати:

$$\xi = e \cos \alpha, \quad \eta = e \sin \alpha, \quad \zeta = t\alpha / 2\pi = m\alpha, \quad (3)$$

де e, t, α – радіус (ексцентриситет), крок і кутова координата вихрового джгута; при $\alpha=0$ маємо $\zeta=0$. Координати x, y, z довільної точки N записуються:

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = t\alpha_1 / 2\pi = m\alpha_1, \quad (4)$$

де r, φ, z – циліндричні координати точки N ; α_1 – значення кута α , при якому $\zeta=z$. Параметр m можна визначити через ексцентриситет – e і кут нахилення гвинтової лінії вихрового джгута – $\beta_{ж}$ (5):

$$m=t/2\pi=2\pi e \operatorname{tg}\beta_{\text{ж}}/2\pi = e \operatorname{tg}\beta_{\text{ж}}=\bar{e} R \operatorname{tg}\beta_{\text{ж}}, \quad (5)$$

де R – радіус відсмоктууючої труби, $\bar{e} = e/R$ – відносний ексцентриситет вихрового джгута. Підставляючи ξ, η, ζ із (3) і x, y, z з (4) у (2), маємо

$$\bar{V}_{\text{ж}} = f(\Gamma, \bar{e}, R, \beta_{\text{ж}}, \varphi, \alpha_1, \rho), \quad (6)$$

де $\rho = \sqrt{e^2 + r^2 - 2er \cos(\alpha - \varphi) + m^2(\alpha - \alpha_1)} = R\sqrt{\bar{r}^2 - 2\bar{e}\bar{r} \cos(\alpha - \varphi) + \bar{e}^2[1 + (\alpha - \alpha_1)^2 \operatorname{tg}^2\beta_{\text{ж}}]}$ – відстань між точками $M(e, \alpha, \zeta)$ та $N(r, \varphi, z)$, $\bar{r} = r/R$ – відносна відстань від довільної точки N поза вихором до осі турбіни.

Узгодження між проекціями швидкостей у циліндричній і декартовій системах координат:

$$V_r = V_x \cos\varphi + V_y \sin\varphi, \quad V_\varphi = V_y \cos\varphi - V_x \sin\varphi, \quad V_z = V_z. \quad (7)$$

Розглянемо багатовихрову схему – випадок з декількома фізичними вихровими джгутами. Підставляючи проекції V_x, V_y, V_z швидкості $V_{\text{ж}}$ з (6) в (7), знаходимо складові швидкості, яка індуцьована одним з декількох фізичних вихрових джгутів рівної інтенсивності у довільній точці $N(r, \varphi, z)$ у циліндричній системі координат:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{ж}sr} &= \frac{\Gamma(\bar{e}R)^2 \operatorname{tg}\beta_{\text{ж}}}{4\pi z_{\text{ж}}} \int_{\alpha_{\text{SH}}}^{\alpha_{\text{SK}}} \frac{\sin(\alpha_s - \varphi) - (\alpha_s - \alpha_1) \cos(\alpha_s - \varphi)}{\rho_s^3} d\alpha \\ V_{\text{ж}s\varphi} &= \frac{\Gamma\bar{e}R^2 \operatorname{tg}\beta_{\text{ж}}}{4\pi z_{\text{ж}}} \int_{\alpha_{\text{SH}}}^{\alpha_{\text{SK}}} \frac{\bar{r} - \bar{e}[\cos(\alpha_s - \varphi) + (\alpha_s - \alpha_1) \sin(\alpha_s - \varphi)]}{\rho_s^3} d\alpha \\ V_{\text{ж}sz} &= \frac{\Gamma\bar{e}R^2}{4\pi z_{\text{ж}}} \int_{\alpha_{\text{SH}}}^{\alpha_{\text{SK}}} \frac{\bar{e} - r \cos(\alpha_s - \varphi)}{\rho_s^3} d\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де $z_{\text{ж}}$ – число фізичних вихрових джгутів, ρ_s – відстань між точкою на вихровому джгуті $M_s(e, \alpha_s, \zeta)$ і точкою $N(r, \varphi, z)$ в довільному місці відсмоктууючої труби для випадку з декількома фізичними вихровими джгутами, s – порядковий номер фізичного вихрового джгута, а $\alpha_s = \alpha + 2\pi(s-1)/z_{\text{ж}}$, $\rho_s = R\left\{\bar{r}^2 - 2\bar{e}\bar{r} \cos(\alpha_s - \varphi) + \bar{e}^2[1 + (\alpha_s - \alpha_1)^2 \operatorname{tg}^2\beta_{\text{ж}}]\right\}^{1/2}$.

Швидкості, які індуцьовані вихровою поверхнею, що моделює стінки відсмоктууючої труби, є функціями багатьох параметрів

$$\bar{V}_{\text{п}} = f[e, \beta_{\text{ж}}, \gamma(\alpha_2), \varphi, \alpha_1, \rho_{\text{п}}], \quad (9)$$

Невідома функція $\gamma(\alpha_2)$ в (9) визначається при виконанні граничних умов на стінці відсмоктууючої труби:

$$\sum_{s=1}^{z_{\text{ж}}} V_{\text{ж}rs} + V_{\text{пр}} = 0, \quad (10)$$

$$R \sin\beta_{\text{п}} \int_0^{2\pi} \gamma(\alpha_2) d\alpha_2 = -\Gamma, \quad (11)$$

де $\gamma(\alpha_2)$ – напруженість вихрового шару (вихрової поверхні), що моделює стінку відсмоктууючої труби; $\beta_{\text{ж}}$ – кут нахилу вихрової лінії вихрової поверхні; $\Gamma = \Gamma_{2\text{BT}}$, а $\Gamma_{2\text{BT}}$ – циркуляція за робочим колесом біля втулки.

Ці умови дозволяють визначити напруженість $\gamma(\alpha_2)$ із (10) з урахуванням (11). Підставляючи із рівняння (8) вираз для $V_{жст}$ і $V_{пр}$ з (9) у (10) і враховуючи, що $r/R=1$, $\alpha_1=const$, маємо рівняння

$$\lambda \int_0^{2\pi} \gamma(\alpha_2) F(\varphi, \alpha_2) d\alpha_2 = f(\varphi). \quad (12)$$

Рівняння у формі (12) є рівнянням Фредгольму 1 роду. В дисертаційній роботі воно одержано для багатовихрової схеми, а функції $F(\varphi, \alpha_2)$, $f(\varphi)$ і λ визначені в залежності від $\beta_{ж}$, що дозволяє при розрахунках безпосередньо вживати експериментальні дані по кутах $\beta_{ж}$. Для одновихрової схеми це рівняння було складено Григор'євим В.І. Для виконання вимоги (10) в розрахунковому перетині ($z=0$), який розміщується на відстані $0.5D_1$ від ободу робочого колеса у відсмоктуючій трубі (рис.1а), виконуємо ряд рішень (12) для розрахункової висоти труби. Приблизно в цьому ж місці, згідно з вимогами МЕК, встановлюється датчик для вимірювання тиску у трубі.

Звісно, що безпосереднє рішення рівняння Фредгольму 1 роду (12) викликає труднощі у зв'язку з його некоректністю. Тому функцію $\gamma(\alpha_2)$ задаємо в вигляді ряду Фур'є з невідомими коефіцієнтами

$$\gamma(\alpha_2) = a_0/2 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\alpha_2 + b_k \sin k\alpha_2) \quad (13)$$

З (13) витікає, що число невідомих коефіцієнтів ряду дорівнює $(2n+1)$, де n – число гармонік, k – номер гармоніки. Тому що a_0 легко знаходиться, використовуючи другу граничну умову (11), то в подальшому маємо число невідомих $2n$, які знаходимо з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з числом рівнянь також $2n$, які побудовані на основі граничної умови (10) в перетвореному вигляді (12). Підставляючи (13) в другу граничну умову (11) знаходимо $a_0 = -\Gamma_{2вг}/\pi R \sin \beta_{п}$.

Уведемо в (13) позначення: $a_k = x_k$ і $b_k = x_{k+n}$, де $1 \leq k \leq n$, k – номер гармоніки. Рівняння (13) в такому випадку записуємо:

$$\gamma(\alpha_2) = -\frac{\Gamma_{2вг}}{2R\pi \sin \beta_{п}} + \sum_{k=1}^n x_k \cos k\alpha_2 + \sum_{k=1}^n x_{k+n} \sin k\alpha_2. \quad (14)$$

Для розрахунку $\gamma(\alpha_2)$ необхідно визначити невідомі коефіцієнти x_k і x_{k+n} в (13). Для отримання необхідного числа рівнянь треба поділити периметр поперечного перерізу відсмоктуючої труби в розрахунковому перетині ($z=0$) на число частин, яке дорівнює подвійному числу гармонік ($2n$) і в точках ділення (розрахункові точки) записуємо перетворені умови „непротікання” (10) зі зміною $\gamma(\alpha_2)$ згідно (14). З метою підвищення точності розрахунків було розглянуто рішення СЛАР для випадку її перевизначеності, що підвищує інформативну значимість невідомих коефіцієнтів x_k і x_{k+n} . В такому випадку приймаємо число розрахункових точок на контурі відсмоктуючої труби значно більше, ніж число невідомих коефіцієнтів, тобто $p \geq 2n$. Отже, одержуємо перевизначену СЛАР у вигляді (15):

$$\left. \begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^n x_k \int_0^{2\pi} \cos k\alpha_2 F(\alpha_2, \varphi_1) d\alpha_2 + \sum_{k=n+1}^{2n} x_{k-n} \int_0^{2\pi} \sin k\alpha_2 F(\alpha_2, \varphi_1) d\alpha_2 = \frac{1}{\lambda} f(\varphi_1) + \\
 & + \frac{\Gamma}{2\pi R \sin \beta_{\Pi}} \int_0^{2\pi} F(\alpha_2, \varphi_1) d\alpha_2, \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \sum_{k=1}^n x_k \int_0^{2\pi} \cos k\alpha_2 F(\alpha_2, \varphi_p) d\alpha_2 + \sum_{k=n+1}^{2n} x_{k-n} \int_0^{2\pi} \sin k\alpha_2 F(\alpha_2, \varphi_p) d\alpha_2 = \frac{1}{\lambda} f(\varphi_{2n}) + \\
 & + \frac{\Gamma}{2\pi R \sin \beta_{\Pi}} \int_0^{2\pi} F(\alpha_2, \varphi_p) d\alpha_2.
 \end{aligned} \right\} (15)$$

де $\varphi_i = 2\pi(i-1)/p$, i – номер розрахункової точки, а $p \geq 2n$.

Система (15) може бути записана також в матричному вигляді

$$Ax = b, \quad (16)$$

де A – неквадратна матриця розмірності $(p) \times (2n)$ з елементами:

$$\begin{aligned}
 a_{ij} &= \int_0^{2\pi} \cos j\alpha_2 F_i(\alpha_2, \varphi_i) d\alpha_2, \quad 1 \leq j \leq n, \text{ а } j=k, \\
 a_{ij} &= \int_0^{2\pi} \sin (j-n)\alpha_2 F_i(\alpha_2, \varphi_i) d\alpha_2, \quad n+1 \leq j \leq 2n, \text{ а } j=k+n;
 \end{aligned} \quad (17)$$

x – шуканий вектор-стовпець, b – відомий вектор-стовпець з елементами:

$$b_i = \frac{1}{\lambda} f(\varphi_i) + \frac{\Gamma_{2\text{вт}}}{2\pi R \sin \beta_{\Pi}} \int_0^{2\pi} F_i(\alpha_2, \varphi_i) d\alpha_2.$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів використовуємо принцип найменших квадратів. Вибір рішення ведемо по отриманій мінімальній нев'язці

$$S = \sum_{i=1}^p \left[b_i - \sum_{j=1}^{2n} a_{ij} x_j \right]^2 \longrightarrow \min \text{ системи рівнянь (15).}$$

Тоді рішення СЛАР (16) має вигляд

$$\tilde{A}Ax = \tilde{A}b, \quad (18)$$

де \tilde{A} – транспонована матриця, а $\tilde{A}A$ – квадратна матриця розмірності $2n \times 2n$, незалежно від того, як сильно була перевизначена система.

Таким чином, з рішення (18) знаходимо коефіцієнти x_j , а потім визначаємо напруженість вихрового шару $\gamma(\alpha_2)$. Для реалізації системи (18) використовуємо чисельні методи Гаусса з вибором головного елемента. Інтегралі, які входять у систему рівнянь, розраховуються по формулах Сімпсона і схемі інтегрування Гаусса.

Маючи розподіл $\gamma(\alpha_2)$ визначаємо V_{Π} , а потім і сумарну швидкість на стінці відсмоктуючої труби по (1). Осьова (витратна) та окружна (від циркуляційного вихрового потоку) складові швидкості V_q додаткового осесиметричного потоку у (1) визначаються по залежностях

$$V_{qc} = Q/\pi \cdot R^2 \left(1 - \sum_{i=1}^{z_{\text{ж}}} \bar{d}_{\text{ж}}^2\right) \text{ і } V_{q\varphi} = \frac{\Gamma_{2\text{пер}} - \Gamma_{2\text{вт}}}{2\pi R} \text{ відповідно.}$$

Розрахунки максимальної і мінімальної сумарних швидкостей проводяться у розрахунковому перетині при постійному значенні циркуляції для обраного режиму по оборотах і витраті на стінці відсмоктуючої труби. Подвійну амплітуду пульсацій тиску визначаємо з використанням інтегралу Бернуллі:

$$2A/H = (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)/2g H, \quad (19)$$

де A – амплітуда пульсацій тиску, м; H – напір випробувань, м.

В (19) V_{\max} і V_{\min} визначені із урахуванням формул $V = (V_r^2 + V_\varphi^2 + V_z^2)^{1/2}$,

де $V_r = \sum_{s=1}^{z_{ж}} V_{жsr} + V_{пр}$; $V_\varphi = \sum_{s=1}^{z_{ж}} V_{жs\varphi} + V_{п\varphi} + V_{q\varphi}$; $V_z = \sum_{s=1}^{z_{ж}} V_{жsz} + V_{пz} + V_{qz}$ (на стінці $r/R=1, V_r=0$).

Для розрахунку частоти пульсацій тиску визначаємо окружну швидкість на одному з фізичних вихрових джгутів у розрахунковому перетині при $r = e$:

$$V'_\varphi = \sum_{S=1}^{S=z_{ж}} V_{жs\varphi} + V_{п\varphi}. \quad (20)$$

В (20) $V_{жs\varphi}$ – окружна складова швидкості, що індукційована фізичними вихровими джгутами; $V_{п\varphi}$ – окружна складова швидкості, яка індукційована вихровою поверхнею, що моделює стінку відсмоктуючої труби. В (20) не урахована $V_{q\varphi}$, що має невеликі значення при $e=0-0.6$. Визначивши V'_φ , знаходимо кутову частоту обертання джгута $\omega_{ж} = V'_\varphi/e$ і частоту пульсацій тиску за робочим колесом – $f_{ж} = V'_\varphi z_{ж} / 2\pi e$.

У третьому розділі наведені результати чисельних експериментів по прогнозуванню пульсацій тиску, які проводились згідно вище приведеної математичної моделі. Послідовність розрахунків наведена на спрощеній схемі (рис.2).

Програми для визначення пульсацій тиску складені на мові Фортран і у середовищі Mathcad. Одержані прогнозні пульсаційні характеристики для турбін PO115, PO230 (рис.4), PO310 розробки ВАТ “Турбоатом”. Отриманий рівень пульсацій тиску є допустимим і гарантує надійну роботу гідротурбін.

Важливим моментом була підготовка геометричних параметрів вихрових джгутів – ексцентриситету, відносного діаметра і кута нахилення вихрової лінії для розрахунку пульсацій тиску. Вона здійснювалася на основі апроксимації даних, що були одержані з візуальних експериментів з фотографуванням вихрових джгутів і з використанням датчика-зонда тиску.

Для вихрових джгутів гідротурбін на основі експериментів були одержані поліномні залежності відносного ексцентриситету – \bar{e} , відносного діаметра – $\bar{d}_{ж}$, а також кута нахилення вихрової лінії – $\beta_{ж}$ у полі універсальної пульсаційної характеристики у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \bar{e}(n'_1, Q'_1) &= A_0 + A_1 Q'_1 + A_2 Q_1'^2 \\ \bar{d}_{ж}(n'_1, Q'_1) &= B_0 + B_1 Q'_1 + B_2 Q_1'^2 \\ \beta_{ж}(n'_1, Q'_1) &= 90^\circ (1 - C_1 Q'_1 + C_2 Q_1'^2 + C_3 Q_1'^3) \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

де $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3$ – змінні коефіцієнти, що є поліномами від n'_1 .

Для модельної гідротурбіни РО170 $\bar{e}, \bar{d}_ж, \beta_ж$ були визначені із експериментів для зони $\bar{Q}'_1 = 0,4 - 1,2$, $\bar{n}'_1 = 0,9 - 1,1$, де $\bar{n}'_{1i} = \frac{n'_{1i}}{n'_{1opt}}$, $\bar{Q}'_{1i} = \frac{Q'_{1i}}{Q'_{1opt}}$ (рис.3).

Ці параметри можуть бути також визначені за допомогою приблизних емпіричних залежностей типу $\bar{e} = (4|(\bar{Q}'_1 - \bar{n}'_1)|\bar{Q}'_1 + 1)/(4 + |(\bar{Q}'_1 - \bar{n}'_1)|\bar{Q}'_1)$, $\beta_ж = 90(1 - ke^{1/2})$, де $k = 0,7 - 0,9$, і які були одержані на основі модельних експериментів для гідротурбін РО115-170.

З урахуванням отриманих апроксимацій (21) були виконані розрахунки по прогнозуванню пульсацій тиску для РО гідротурбін для діапазону напорів 100-300 м. Розширення діапазону застосування залежностей (21) по напорах потребує додаткових розрахунково-експериментальних досліджень. На рис.3 представлені залежності $\bar{e}, \bar{d}_ж, \beta_ж$ від \bar{Q}'_1 при розрахунковому напорі $\bar{n}'_1 = \bar{n}'_{1p}$ для випадку одного вихрового джгута.

Визначення циркуляції за робочим колесом здійснювалося на основі спрощеної осередненої осесиметричної задачі з урахуванням робіт Етінберга І.Е. і Гольдіна С.Л. Спочатку визначалася швидкість V_m із рівняння $dV_m/dl + M(l)V_m = N(l)$, а потім розраховувалась циркуляція за робочим колесом біля втулки $\Gamma_{2вт} = 2\pi R_{2вт}(R_{2вт}\pi n/30 - V_m \text{ctg}\beta_{2вт})$, де $\beta_{2вт} = \beta_2 + \Delta\beta$, а $\Delta\beta = 1^\circ - 3^\circ$.

На рис.4 наведені розрахункові амплітуди пульсацій тиску у гідротурбіні РО230 у випадку одного вихрового джгута. Зліва від оптимуму визначаємо границю переходу від одновихрової схеми до двовихрової (лінія II-II) по значенню параметра $P = 2,5$, який визначений з експериментів у роботах Фелвея Г. Лінія I-I задовольняє умові $\bar{e} + \bar{r}_ж \leq 0,98$, зліва від неї \bar{e} змінюється по лінійному закону від $\bar{e} = \bar{e}_{\max}$ до $\bar{e} = 0$ при $\bar{Q}'_1 = 0$ (рис.3). Праву від оптимуму границю переходу одного вихрового джгута до двох приймаємо на основі експериментальних даних: її координати по витраті, приблизно $(1,15 - 1,3)\bar{Q}'_{1opt}$ – лінія III-III. Розглянута методика дозволяє виконати розрахунки пульсацій тиску для випадку з декількома вихровими джгутами при наявності додаткових даних про їх геометрію та інтенсивність. Шляхом накладання характеристик у полі $Q'_1 - n'_1$ можна отримати сумарну пульсаційну характеристику.

У четвертому розділі представлений опис і конструкції тензометричних датчиків для виміру пульсацій тиску, їх тарировка; наведено опис апаратури (осцилографи і аналізатори спектра частот), яка використовувалась при проведенні досліджень пульсацій тиску, а також обладнання і діапазони режимів роботи модельних гідротурбінних стендів на яких проводились випробування. Наведена методика експериментальних випробувань та надані оцінки похибок при вимірюванні пульсацій тиску у гідротурбінах.

П'ятий розділ містить результати модельних та натурних експериментальних досліджень пульсацій тиску (рис.5) у гідротурбінах на напори 100-300 метрів (РО115, П'єдра дель Агіла ГЕС, Аргентина; РО230, Ірганайська ГЕС, Росія – модельні випробування; РО310, Нурекська ГЕС, Таджикистан – натурні) і порівняння цих результатів з результатами чисельних

експериментів, яке підтверджує ефективність розробленої методики. Середня різниця між розрахунком і експериментом у цих турбінах становить 15-20%.

Цей розділ також містить спеціальні дослідження в модельних гідротурбінах: визначення пульсацій тиску на робочому колесі PO115 [4], осьової сили в гідротурбіні PO230 [6]. Наведені результати експериментів по визначенню швидкостей за допомогою інерційних кулькових зондів у гідротурбіні PO115, далі за цими даними розраховувалась циркуляція за робочим колесом. Різниця між розрахунковими швидкостями, які отримані з осесиметричної задачі, і швидкостями, що виміряні зондами, складає, у середньому, 10-15%. Дані візуальних експериментальних досліджень з визначення ексцентриситету, діаметра та кута нахилення вихрового джгута наведені у дисертації в залежності від режиму роботи для модельних гідротурбін PO115, PO140, PO170. Наведені результати експериментів з визначення ексцентриситету джгутів у відсмоктуючій трубі гідротурбіні PO170 за допомогою тензометричного зонду для вимірювання тиску.

В цьому розділі містяться результати вимірювань низькочастотних пульсацій тиску у проточній частині та на лопатях робочого колеса гідротурбіни PO310 (Нурекська ГЕС) при натурних випробуваннях.

Розглянуті шляхи зменшення низькочастотних пульсацій тиску [5, 7, 8]. Наведено ефективність застосування поворотного елемента лопаті (ПЕЛ) біля втулки робочого колеса (рис.6а) на основі досліджень пульсацій тиску за допомогою тензометричного зонда та поля швидкостей визначеного за допомогою інерційних кулькових зондів. Використання ПЕЛ на куті відкриття $+5^\circ$ дозволило знизити пульсації тиску в 1,5-2 рази на режимах форсування потужності у турбінному режимі гідромашини. Використання подовженого обтічника робочого колеса (довжиною $L_{об}=0,35 D_1$ замість $0,2 D_1$) у гідротурбіні PO230 дало можливість зменшити пульсації тиску на 2-3% від напору на нерозрахункових режимах (рис.6б). Впуск повітря під робочі колеса гідротурбін PO115, PO230 на нерозрахункових режимах призвів до значного зниження пульсацій тиску (рис.7).

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на створення обґрунтованої методики чисельного прогнозування джгутових пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі гідротурбіни на основі просторової математичної моделі, проведення комплексу експериментів по визначенню рівня пульсацій тиску і структури потоку, а також застосування засобів, що дозволяють зменшити джгутові пульсації у гідротурбіні. У процесі досліджень сформульовані такі висновки:

1. Розроблена методика розрахунку дозволяє отримати прогнозні пульсаційні характеристики у широкому діапазоні режимів роботи гідротурбіни з урахуванням границь переходу від одного вихоря до двох. Створені програмні засоби, що дозволяють прогнозувати низькочастотні пульсації тиску у відсмоктуючій трубі. Прогнозні рівні пульсацій тиску можуть бути використані в розрахунках на динамічну міцність елементів порожнини гідротурбіни і для уточнення зони її експлуатації.

2. Розроблена просторова математична модель для розрахунку амплітуд і частот джгутових пульсацій тиску у відсмоктуючих трубах радіально-осьових гідротурбін з урахуванням довільного числа вихрових джгутів, додаткового осесиметричного потоку через турбіну і з заданням функції напруженості вихрового шару труби у вигляді ряду Фур'є. Виконано чисельну реалізацію задачі. Це дозволило одержати прогнози пульсаційні характеристики, що задовільно узгоджуються з експериментальними характеристиками.

3. Застосування осесиметричної задачі дає можливість розраховувати інтенсивність вихрових джгутів з урахуванням геометрії вихідної кромки лопаті через циркуляцію у втулкових перетинах робочого колеса. Проведене порівняння циркуляції, що була одержана на основі розрахунків, з циркуляцією, що була одержана із зондових випробувань, свідчить про задовільне їхнє узгодження.

4. Для розрахунку напруженості вихрового шару, що моделює стінку відсмоктуючої труби, шукається рішення інтегрального рівняння Фредгольма у вигляді ряду Фур'є. Обчислення напруженості вихрового шару зводилося до рішення перевизначеної СЛАР. Подвійна амплітуда низькочастотних пульсацій тиску визначалася за допомогою інтеграла Бернуллі.

5. Візуальні дослідження з фотографуванням вихрових джгутів і дослідження потоків у відсмоктуючій трубі за допомогою датчиків-зондів тиску дали можливість одержати експериментально апроксимаційні залежності змінення геометричних параметрів вихрових джгутів (ексцентриситета, діаметра та кута нахилення вихрової лінії) від режиму роботи гідротурбіни і більш точно прогнозувати джгутові пульсації тиску.

6. Порівняння розрахункових амплітуд пульсацій тиску з експериментальними амплітудами у відсмоктуючій трубі свідчить про їх задовільне узгодження, що підтверджує точність розробленої методики. Максимальні значення амплітуд пульсацій тисків для турбін ВАТ «Турбоатом» у зоні експлуатаційних режимів становлять: для РО115 – 8-10%, для РО230 – 5-7%, для РО310 – 3-4% від напору. Середня різниця при визначенні амплітуд пульсацій тиску у цих гідротурбінах між розрахунком та експериментом становить 15-20%. Цей рівень пульсацій тиску свідчить про допустиму нестационарність потоку в досліджених турбінах, що необхідно для надійної їхньої роботи. Ці дані використовувалися ВАТ «Турбоатом» для вибору експлуатаційних режимів роботи і у розрахунках на міцність деталей і вузлів гідротурбін. Використовувана при дослідженнях пульсацій тиску вимірювальна апаратура і датчики тиску цілком задовольняють вимогам, що пред'являються до вимірювальної апаратури згідно вимогам МЕК. Сумарна похибка вимірювального тракту не перевищувала 4-6,5%.

7. Запропоновані практичні заходи, вживання яких дозволило значно зменшити пульсації тиску у відсмоктуючих трубах гідротурбін. Використання ПЕЛ при куті відкриття $+5^\circ$ дозволило знизити пульсації тиску в 1,5-2 рази на режимах форсування потужності у турбінному режимі модельної ОРО гідромашини. Використання подовженого обтічника робочого колеса у модельній гідротурбіні РО230 дало можливість зменшити пульсації тиску на 2-

3% від напору на нерозрахункових режимах. Впуск повітря під робочі колеса гідротурбін РО115, РО230 на нерозрахункових режимах призвів до значного зниження пульсацій тиску – в 2-4 рази.

8. Основні наукові положення і результати, що викладені у дисертаційній роботі, мають практичну значимість при дослідженні та розробці гідротурбін РО типу та впроваджені на підприємстві ВАТ „Турбоатом”, а також у навчальному процесі у курсах “Нестационарні явища у лопатевих гідромашинах”, „Гідравлічні нестационарності гідроагрегатів ГЕС та ГАЕС” та „Математичні моделі нестационарних явищ у гідротурбінах” (НТУ „ХП”).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Завьялов П.С., Кухтенков Ю.М., Подвойский Ю.А. Прогнозирование пульсаций давлений от нескольких вихревых жгутов за рабочим колесом РО гидротурбины // Вісник Національного технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП». – 2001. – Вип. 129. – Ч.1. – С. 95-104.

Здобувачем виконані чисельні дослідження низькочастотних пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі і наведено їх порівняння з експериментальними даними у гідротурбінах РО230, РО310.

2. Завьялов П.С., Кухтенков Ю.М., Подвойский Ю.А. К вопросу математического моделирования НЧПД в о.т. жестколопастных гидротурбин // Вісник Національного технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП». – 2002. – Т. 12, №9. – С. 83-88.

Здобувачем розроблена методика розрахунку низькочастотних пульсацій тиску від довільного числа вихрових джгутів за робочими колесами у РО гідротурбінах. Приведені результати чисельних розрахунків.

3. Завьялов П.С., Кухтенков Ю.М., Подвойский Ю.А., Гончар И.В. К методу расчета пульсационных характеристик вихревых жгутов за рабочим колесом гидротурбины // Проблемы машиностроения. – Харьков: ИПМаш НАНУ. – 2003. – Т. 6, №2. – С. 84-92.

Здобувачем одержані апроксимаційні залежності змінення геометричних параметрів вихрових джгутів від режимів роботи на основі проведених візуальних досліджень у гідротурбіні РО170.

4. Кухтенков Ю.М. Исследования жгутовых пульсаций давления в радиально-осевой гидротурбине РО115 // Вісник Національного технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – № 17. – С. 41-44.

5. Завьялов П.С., Бондаренко А.В., Кухтенков Ю.М., Гришин А.М. Мероприятия по уменьшению низкочастотных пульсаций давления в радиально-осевых гидротурбинах и обратимых гидромашинах // Вісник Національного технічного університету «ХП»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – №11. – С. 83-90.

Здобувачем розглянуті конструктивні заходи та впуск повітря для зменшення низькочастотних пульсацій тиску у РО гідротурбінах. Наведені

результати експериментальних досліджень на модельних та натурних гідротурбінах, які підтверджують ефективність розробок.

6. Завьялов П.С., Кухтенков Ю.М., Краснопольская Л.И., Гончар И.В. Исследование связи между пульсациями давления и осевой силы в гидротурбине РО230 // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №6. – С. 169-172.

Здобувачем проведений аналіз результатів експериментального визначення пульсацій тиску у проточній частині і осьової сили на валу гідротурбіни РО230.

7. Патент України UA 8379.SU1353924.A1, FO3, В 3/12, 29.12.97, Бюл.6 / Рабочее колесо высоконапорной радиально-осевой гидромашины / Завьялов П.С., Бондаренко А.В., Гришин А.М., Кухтенков Ю.М., Чалый И.А. (Украина). – 4 с.: ил.

Здобувачем запропоновано використання поворотного елемента лопаті робочого колеса РО гідромашини; досліджена дієвість елемента за допомогою зондів при різних режимах роботи.

8. Патент України на корисну модель №5155 від 15.02.05, бюл.№2. Рабочее колесо высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / Потетенко О.В., Ковальов С.М., Зав'ялов П.С., Кухтенков Ю.М. (Україна). – 4 с.: ил.

Здобувачем запропонована конструкція лопаті РО робочого колеса гідротурбіни.

АНОТАЦІЇ

Кухтенков Ю.М. Прогнозування низькочастотних пульсацій тиску у радіально-осьових гідротурбінах та шляхи їх зменшення. - 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, 2007.

Дисертаційна робота спрямована на прогнозування пульсаційних характеристик гідротурбін на основі просторової математичної моделі руху вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі і зниження рівня джгутових пульсацій за рахунок застосування різних конструктивних засобів.

В роботі вміщено аналіз існуючих методів розрахунку та дослідження пульсаційних характеристик радіально-осьових гідротурбін.

В дисертації дано опис математичної моделі для прогнозування низькочастотних пульсацій тиску від довільного числа фізичних вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі та розглянуті питання її використання, подано методичку чисельного розрахунку та побудови прогнозних пульсаційних характеристик, що дозволяє проводити порівняльну оцінку розроблених проточних частин радіально-осьових гідротурбін на стадії проектування.

Надано порівняння прогнозних пульсаційних характеристик для радіально-осьових гідротурбін на напір 115-310 метрів з модельними і натурними експериментальними даними, а також досліджені способи, які

дозволяють зменшити джгутові пульсації тиску.

Ключові слова: радіально-осьова гідротурбіна, проточна частина, відсмоктуюча труба, вихровий джгут, пульсації тиску, пульсаційна характеристика, математична модель.

Кухтенков Ю.М. Прогнозирование низкочастотных пульсаций давлений в радиально-осевых гидротурбинах и пути их уменьшения. - 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, 2007.

Диссертационная работа посвящена прогнозированию пульсационных характеристик гидротурбин на основе пространственной математической модели движения вихревых жгутов в отсасывающей трубе гидротурбины и снижению уровней жгутовых пульсаций давления за счет применения различных конструктивных мероприятий.

В работе приведен обзор и анализ современных методов расчета и исследования жгутовых пульсаций давления в отсасывающих трубах гидротурбин.

В диссертации дано описание математической модели для прогнозирования низкочастотных пульсаций давления для произвольного числа физических вихревых жгутов в отсасывающей трубе и рассмотрены вопросы ее использования. Рассмотрена методика численного расчета и построения прогнозных пульсационных характеристик, которая позволяет проводить сравнительную оценку разрабатываемых проточных частей радиально-осевых гидротурбин на стадии проектирования.

Рассмотрена пространственная математическая модель расчета пульсаций давления для вихревых жгутов равной интенсивности в цилиндрической отсасывающей трубе. Стенки отсасывающей трубы моделируются вихревой поверхностью, состоящей из бесконечно большого числа бесконечно тонких вихревых нитей переменной интенсивности и с шагом равным шагу основных физических вихревых жгутов. Задача рассмотрена в квазистационарной постановке, в предположении, что жидкость невязкая, основной поток потенциальный, а вихревые жгуты являются особенностями. Учтен дополнительный осесимметричный поток. Определяются скорости в любой точке отсасывающей трубы. Расчет максимальной и минимальной скоростей производится в расчетном сечении, расположенном на расстоянии $0,5D_1$ от обода рабочего колеса, на данном режиме при постоянном значении циркуляции за рабочим колесом. Двойная амплитуда пульсаций давления определяется с использованием интеграла Бернулли.

Применение осесимметричной задачи дало возможность определять интенсивность вихревых жгутов с учетом геометрии выходной кромки лопасти через циркуляцию у втулочных сечений рабочего колеса. Проведенное сравнение циркуляции, рассчитанной с применением осесимметричной задачи, с циркуляцией, полученной в результате экспериментальных зондовых

испытаний, свидетельствует об их удовлетворительном согласовании; разница между расчетом и экспериментом, в среднем, составляет 10-15%.

Приведенная методика позволяет выполнить численные эксперименты для одного или нескольких вихревых жгутов. Путем наложения характеристик можно получить результирующую пульсационную характеристику. Определены границы перехода от одновихревой схемы к двухвихревой.

Представлены результаты численных экспериментов и получены прогнозные пульсационные характеристики для гидротурбин PO115, PO230, PO310, которые разработаны ОАО "Турбоатом". Сравнение расчетных данных по прогнозированию пульсационных характеристик с данными пульсационных испытаний на модельных стендах свидетельствует об их удовлетворительном согласовании, что подтверждает точность разработанной методики. Максимальные значения амплитуд пульсаций давления для турбин ОАО «Турбоатом» в зоне эксплуатационных режимов составляют для PO115 – 8-10%, для PO230 – 5-7%, для PO310 – 3-4% от напора. Средняя разница между расчетными и экспериментальными амплитудами пульсаций давления в этих гидротурбинах составляет – 15-20%.

Получены аппроксимационные зависимости геометрических параметров вихревых жгутов (эксцентриситета, диаметра и угла наклона вихревой линии) в отсасывающей трубе в широком диапазоне режимов работы для прогнозирования пульсаций давления на основе данных визуальных экспериментальных исследований и зондирования потока в трубе с помощью датчиков-зондов давления для гидротурбин PO115, PO140, PO170.

Использованные в экспериментальных исследованиях по определению уровня пульсаций давления, измерительно-вычислительный комплекс стенда ОАО «Турбоатом», аппаратура, тензометрические датчики давления и датчики-зонды полностью удовлетворяют современным требованиям МЭК, предъявляемым к измерительной аппаратуре. Суммарная погрешность измерительного тракта не превышала 4-6,5%.

Рассмотрены практические мероприятия, применение которых позволило значительно уменьшить жгутовые пульсации давления в отсасывающих трубах гидротурбин. Использование ПЭЛ при угле открытия $+5^\circ$ позволило снизить пульсации давления в 1,5-2 раза на режимах форсирования мощности в турбинном режиме РО гидромашин. Применение удлиненного обтекателя рабочего колеса в модельной гидротурбине PO230 дало возможность уменьшить пульсации давления на 2-3% от напора на нерасчетных режимах. Впуск воздуха под рабочие колеса модельных гидротурбин PO115, PO230 на нерасчетных режимах привел к значительному снижению пульсаций давления.

Ключевые слова: радиально-осевая гидротурбина, проточная часть, отсасывающая труба, вихревой жгут, пульсации давления, пульсационная характеристика, математическая модель.

Kuhtenkov Y.M. Forecasting of low-frequency pulsations of pressure in Francis turbine and a way of their reduction. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree on specialty 05.05.17 -

hydraulic machines and hydropneumatic devices. – National Technical University “Kharkov polytechnical institute”, Kharkov, 2007.

In work the analysis of existing methods of calculation and research pulsation characteristics of Francis turbine runners are given.

The description of mathematical model for forecasting low-frequency pulsations of pressure from any number physical vertical swirls in draft tube is given and questions of its use are considered, the numerical design procedure and constructions forecasting pulsations characteristics which allows to carry out the comparative estimation, cultivations flowing parts in the Francis turbine runners on a design stage are given.

Comparison forecasting pulsations characteristics in Francis turbine runners on pressures of 115-310 meters with modelling and natural experimental data is given.

Key words: the Francis turbine, a flowing part, draft tube, vertical swirl, pulsations of pressure, pulsations the characteristic, mathematical model.

Підписано до друку 3.03.08 р. Формат 60x84¹/₁₆. Папір офсетний.

Друк ризографія. Гарнітура Times. Обсяг 0,9 авт. арк.

Наклад 100 прим. Замовлення № 005089.

Надруковано в типографії ПП Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 04058841 Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16.