

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Алексенко Ольга Василівна

УДК 621.65

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ
ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЛОПАТЕВИХ НАСОСІВ**

05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2006

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана в Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Неня Віктор Григорович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри
інформаційних технологій проектування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фінкельштейн Зельман Лазаревич,
Донбаський державний технічний університет,
професор кафедри гірничої енергомеханіки
та обладнання;

кандидат технічних наук
Дранковський Віктор Едуардович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
доцент кафедри гідравлічних машин.

Провідна установа - Національний технічний університет
України "Київський політехнічний інститут", м. Київ.

Захист відбудеться 30 березня 2006 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03
у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету (м. Суми,
вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий 28 лютого 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Савченко Є.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Збереження і подальше підвищення конкурентноспроможності продукції насособудівної галузі України потребує як розробки нового насосного обладнання, так і модернізації існуючих насосних агрегатів шляхом зміни застарілих чи малопрацевдатних на перекачуваних середовищах з новими властивостями і складом, їх окремих елементів та вузлів.

При створенні нових насосів гідродинамічного принципу дії під задані умови (робочі параметри, властивості і склад перекачуваного середовища та інше) процес проектування починається з розробки проточної частини насоса. В свою чергу до першого етапу її виконання відноситься вибір конструктивної схеми проточної частини насоса. На сьогодні останній проводиться практично інтуїтивно – базується на власному досвіді відповідного колективу конструкторів. Відсутність об'єктивних механізмів для визначення кількісних критеріїв оптимізації на цьому етапі проектування не дозволяє перевести дану задачу в площину її вирішення шляхом використання сучасної теорії оптимізації. Це знижує якість рішень, які приймаються. Додаткова причина появи похибок при прийнятті подальших необхідних рішень традиційним шляхом – не враховується вплив перетоків робочої рідини між проточною частиною (підвід, робоче колесо, відвід) та допоміжним трактом насоса (канали ущільнень, щілини між ротором та корпусом і т.і.). Враховуючи незначні розміри проточної частини відцентрових насосів у порівнянні, наприклад, із енергетичними гідравлічними турбінами, перетоки складають помітну частину витрати робочої рідини через насос і впливають на його характеристики.

Окремою задачею стосовно проектування нових насосів загальнопромислового призначення є необхідність скорочення типорозмірів насосних агрегатів для підвищення серійності їх виробництва при розширенні кількості модифікацій базових конструкцій для задовільнення різноманітних потреб їх споживачів. Вирішення такої задачі можливе шляхом переходу до блочно-модульного конструювання даних насосних агрегатів, включаючи поділ проточної частини насоса на окремі модулі. Остання задача є недостатньо вивченою, в різній мірі у всіх її складових: визначення елементної бази окремих модулів проточної частини, формулювання вимог до параметрів потоку на вході і виході кожного модуля і визначення способу їх забезпечення, врахування впливу тієї чи іншої сукупності модулів на характеристику та працевдатність насоса в цілому. Остання складова на сьогодні розв'язується тільки шляхом фізичного експерименту, як правило, на натурних зразках – це потребує великих часових і фінансових витрат. Потрібен інструмент хоча би для часткової заміни фізичного експерименту на розрахунковий з використанням можливостей сучасної комп'ютерної техніки.

Найбільш інтенсивно в сьогоднішніх умовах розвивається напрям модернізації вже існуючого насосного обладнання з метою покращення тих чи інших його експлуатаційних показників якості.

Значних успіхів досягнуто в створенні модифікованих кінцевих ущільнень насосів та з'єднувальних муфт валів насоса і двигуна у складі того чи іншого насосного агрегату, впровадженні нових матеріалів. Разом з тим, відчутним є відставання в частині модернізації геометрії елементів проточної частини існуючих насосів з метою зміни наявних робочих параметрів, покращення їх ККД. Однією з основних перешкод в цьому є недосконалість існуючих підходів до врахування впливу нової геометрії і параметрів окремих елементів проточної частини (зміна геометрії і параметрів в дроселюючих каналах, бокових пазухах робочих коліс) на робочу характеристику та працездатність насоса в цілому (вібронадійність, розвантаження осевого зусилля). З цього питання відомими є фундаментальні праці В.А. Марцинковського в частині гідродинаміки дроселюючих каналів, О.С. Байбікова та В.К. Караханьяна в частині гідродинаміки течії в бокових пазухах робочих коліс. Але для проведення цих складних розрахунків потрібне попереднє визначення вихідних даних – проведення своєрідних “ескізних” прорахунків і вибір найбільш перспективних конструктивних виконань проточної частини насоса, яка модернізується шляхом зміни окремих її елементів.

Всі перераховані окремі практично значимі задачі потребують створення однотипного інструменту, який би дозволяв проводити об'єктивний попередній аналіз якості конструктивної схеми проточної частини гідродинамічного насоса. Найбільш складними в цьому відношенні є відцентрові насоси.

Таким чином, задача створення методики автоматизованого вибору конструктивної схеми відцентрових насосів та оцінки їх енергетичних якостей є актуальною. Її розробка та впровадження дозволить для нового насосного обладнання прискорити проектування, зменшити його строки та вартість, підвищити його якість та збільшити енергоефективність та конкурентоздатність самого насосного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету відповідно до науково-технічних програм Міністерства освіти і науки України та реалізована при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт (замовник Міністерство освіти і науки України): “Дослідження нетрадиційних турбомашин і систем для вирішення енергетичних та екологічних проблем” (№ державної реєстрації 0100U003214), особистий внесок здобувача у заключному звіті – підпункт 1.2 “Основи методики інженерного моніторингу гідравлічних мереж”; “Наукові основи технічного забезпечення енергозберігаючих технологій в гідропневмосистемах” (№ державної реєстрації 0103U000769) особистий внесок здобувача у проміжному звіті № 1 – підпункт 3.2.2 “Прогнозування характеристик відцентрових насосів на основі макромодельовання”; у проміжному звіті № 2 – підпункт 1.1.3 “Насосний ефект дисків робочого колеса відцентрового насоса” і підпункт 4.2 – “Побудова функціональних блоків для макромоделі відцентрового насоса”.

Мета і завдання дослідження. *Мета роботи* – розробка комплексної моделі робочого процесу гідравлічної підсистеми відцентрового насоса для подальшого розвитку засобів ведення розрахункового експерименту в насособудуванні.

Для реалізації поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- вибрати методичний підхід до побудови математичної моделі робочого процесу відцентрового насоса як системи, що складається з елементів, які взаємодіють шляхом перерозподілу тиску та витрати робочої рідини у проточному тракту;
- розробити рекомендації щодо розділення проточного тракту відцентрового насоса на елементи, з моделей яких далі буде формуватися модель гідравлічної підсистеми насоса;
- для широкого застосування математичної моделі робочого процесу відцентрового насоса узагальнити наявні математичні моделі типових елементів та створити їх бібліотеку;
- розробити методiku формування комплексної моделі робочого процесу гідравлічної підсистеми відцентрового насоса на базі моделей його типових елементів та протестувати її шляхом зіставлення з результатами експериментальних досліджень;
- розробити алгоритм і програму чисельної реалізації запропонованої комплексної моделі для отримання енергетичних характеристик відцентрових насосів.

Об'єкт дослідження – методика розрахунку робочого процесу відцентрових насосів.

Предмет дослідження – фізичні та математичні моделі та засоби розрахунку робочого процесу відцентрових насосів.

Методи дослідження. Поставлені задачі дослідження вирішувались методами математичного моделювання. Комплексна модель формується на основі законів збереження, які використовуються в технічній гідромеханіці. При побудові комплексної моделі використовується блочно-ієрархічний підхід як елемент системного аналізу. Відцентровий насос моделюється як система, що складається з взаємозв'язаних моделей елементів різного ієрархічного рівня. При цьому кожний рівень моделі характеризується різним ступенем деталізації математичних моделей елементів та єдиним підходом до вирішення конкретних завдань. Комплексна математична модель насоса є системою нелінійних рівнянь, тому використовуються методи лінеаризації та ітераційні методи обчислювальної математики.

Наукова новизна одержаних результатів:

- проведено узагальнення наявних методик моделювання гідромашинних систем і визначено підхід до комплексного моделювання (макромоделювання) робочого процесу гідравлічної підсистеми насоса на основі законів збереження витрати рідини і енергії та принципів системного підходу, що дозволяє виявити і конкретно використати системний ефект від взаємного впливу окремих елементів проточного тракту насоса один на інший;
- запропоновано створити методiku моделювання гідравлічної складової робочого процесу

відцентрового насоса на базі блочно-ієрархічного підходу, що дозволяє моделювати робочий процес гідравлічної підсистеми насоса на різних рівнях деталізації течії в його проточному тракті;

- сформульовані принципи поділу відцентрового насоса на типові елементи та встановлені вимоги до їх моделей з метою подальшого використання в макромоделі робочого процесу насоса, що відкриває можливість створення бібліотеки відповідних типових елементів;

- створено методику побудови макромоделі гідравлічної підсистеми відцентрового насоса з урахуванням перетоків між елементами проточного тракту як одну із складових науково-методичного забезпечення впровадження блочно-модульного проектування в насособудуванні;

- забезпечена можливість використання розробленої методики для підготовки і проведення оптимізації конструктивної схеми проточного тракту відцентрових насосів та автоматизації подальших етапів їх проектування.

Практичне значення отриманих результатів:

- забезпечена можливість досліджувати робочий процес відцентрового насоса на рівні макромоделі його проточного тракту зі зручною формою чисельної реалізації у вигляді відповідного програмного продукту для ПЕОМ;

- створено бібліотеку типових елементів проточного тракту відцентрового насоса та забезпечена можливість її зручного використання і подальшого розширення;

- розроблена з використанням об'єктно-орієнтованого принципу (всі моделі та об'єкти узгоджені інформаційно) програма реалізації робочого процесу проточного тракту відцентрового насоса для ПЕОМ;

- проведено тестування програми на різних технічних об'єктах, розроблені і перевірені алгоритми вибору конструктивної схеми проточного тракту відцентрового насоса, що знов створюється (модернізується), і прогнозного розрахунку його енергетичних характеристик;

- забезпечена можливість широкого впровадження оптимізаційних розрахунків на перших етапах розробки відцентрового насоса, що знов створюється (модернізується), в цілому, автоматизації всього процесу його проектування.

Основні результати дослідження були впроваджені в практику проектування Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту атомного та енергетичного насособудування ВНДІАЕН та в навчальний процес СумДУ, що підтверджується наведеними в дисертації актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачем виконано: розроблена і апробована програма для ПЕОМ стосовно планування розрахункового експерименту в насособудуванні [1], розроблена і апробована програма для ПЕОМ стосовно інженерного

моніторингу гідравлічних мереж [2], запропонована методика формування комплексної моделі насоса та створення бази даних типових елементів проточного тракту відцентрового насоса [3], розроблена програма побудови макромоделі відцентрового насоса та розрахунку його енергетичних характеристик [4], запропоновано використання методики макромодельовання для дослідження нетрадиційних схем відцентрових насосів [5], визначені принципи розподілу проточної частини насоса на типові елементи [6]. Інші доробки, наведені в дисертаційній роботі, виконано здобувачем самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: VII – X Міжнародних науково-технічних конференціях “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, 2002 р.; м. Черкаси, 2003 р.; м. Київ, 2004 р.; м. Краматорськ, 2005 р.); на науково-технічній конференції “Промислова гідравліка і пневматика” (м. Київ, 2004 р.); на XIII Міжнародній науково-технічній конференції “Компресорна техніка і пневматика в XXI столітті” (м. Суми, 2004 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції “Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання” (м. Харків, 2003 р.); на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів СумДУ (щорічно з 2000 по 2005 рр.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображено в 6 статтях у фахових виданнях, затверджених переліком ВАК України. Матеріали дисертаційної роботи використовувались у звітах по НДР.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Обсяг дисертації складає 129 сторінок. Дисертаційна робота містить 24 рисунки, з яких 1 рисунок на окремій сторінці; 3 таблиці по тексту, з яких 1 на окремій сторінці; 3 додатки на 25 сторінках; список використаних літературних джерел із 118 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проведення дослідження стосовно розробки методики побудови комплексної моделі робочого процесу гідродинамічного насоса для подальшого розвитку засобів ведення розрахункового експерименту в насособудуванні. Сформульована мета та задачі дисертаційного дослідження, надана загальна характеристика роботи.

У першому розділі викладені результати огляду сучасного стану проектування гідродинамічних машин та моделювання їх робочого процесу.

При дослідженні фізичних явищ в ході розрахункового експерименту важливо створити таку модель робочого процесу, щоб вона відображала характерні якості об’єкту з достатньою точністю і

в той же час могла бути реалізована в зручному чисельному алгоритмі. На успіх в рішенні цієї проблеми впливає не стільки підвищення швидкодійності обчислювальних систем та збільшення їх пам'яті, скільки розробка раціональних моделей досліджуваних процесів.

Найбільш опрацьовані методики математичного моделювання в галузях радіоелектроніки та електротехніки, авіа- та автомобілебудування. Складність досліджуваних в цих галузях машинобудування процесів течії зумовили використання математичних моделей, в яких моделюється процес обтікання елементів, а не цілих фізичних об'єктів. Дослідження процесів на мікрорівні не може дати зручної з інженерної точки зору інформації про поведінку всієї системи. Тоді як макрорівень моделювання дозволяє не витрачаючи багато часу на дослідження внутрішніх процесів в елементах за їх зовнішніми характеристиками отримати характеристики всього технічного об'єкту як системи.

В галузі гідромашинобудування роботи з створення різних математичних моделей, що вирішують окремі задачі гідродинаміки робочого процесу турбомашин, ведуться вже досить довгий час. Цим питання присвячені роботи Г.В. Вікторова, Б.С. Раухмана, Г.М. Моргунова, В.І. Гнесіна, А.О. Бикова, С.Д. Косторного, С.В. Єршова. Розрахунку гідродинамічних параметрів насосів та автоматизації їх проектування присвячені роботи О.А. Жарковського. Розроблені в роботах вказаних авторів моделі розрахунку течії рідини жорстко прив'язані до окремих видів течій або конкретних типів геометричних моделей.

При проектуванні електричних ланцюгів і машин, гідравлічних мереж гідро- та пневмоприводів О.П. Мєренков, І.П. Норенков, А.І. Петренко, В.В. Чкалов використовували макромоделі технічних об'єктів. Математична модель автоматично будується з моделей елементів на основі теорії графів з дотриманням законів збереження. Дослідження технічного об'єкту за допомогою графу дозволяє розглянути його як систему та визначити параметри течії в елементах з врахуванням взаємодії елементів та їх впливу на параметри системи в цілому. В роботах З.Я. Лур'є математичні моделі гідроприводів розробляються на основі аналогічних підходів з використанням рівнянь руху кінематичних елементів та гідродинаміки рідини.

Вперше розрахунок параметрів лопатевого насоса на базі теорії графів було запропоновано О.С. Байбіковим та В.К. Караханьяном, в роботі яких для розрахунку параметрів допоміжного тракту лопатевого насоса була створена модель у вигляді графу, але використана в роботі методика не дозволяє легко змінювати модель для дослідження варіантів конструктивних схем. В.С. Костишин та Г.А. Сіпайлов для розрахунку течії в насосі використовували підходи макромоделювання та основи електрогідравлічної аналогії. В їх роботах запропоновано задавати насос у вигляді схеми заміщення, подібної за структурою та властивостями до електричної мережі.

Огляд методик проектування відцентрових насосів дозволяє зробити висновок про відсутність комплексної моделі відцентрового насоса. Мікромоделювання на даний час не дозволяє створювати

комплексну модель гідродинамічного насосного агрегату та досліджувати різноманітні варіанти конструкцій.

Вирішити цю проблему можна завдяки переходу на макрорівень моделювання робочого процесу відцентрових насосів. Макромодель спирається на базу математичних моделей елементів системи та дозволяє на основі єдиного підходу досліджувати різні конструктивні схеми насосів, що прискорить процес їх проектування та дозволить розробити механізм пошуку раціонального виконання з точки зору реалізації технічного завдання.

У другому розділі формулюється мета дослідження та виходячи з неї обґрунтовуються задачі, які потрібно вирішити для її досягнення. Обрано методи та засоби проведення дослідження.

Для вирішення поставленої в роботі мети було обрано макрорівень моделювання. Тобто модель відцентрового насоса створюється з математичних моделей її елементів, взаємний зв'язок між якими задається на основі законів збереження. Комплексна модель графічно представляє собою схему заміщення, яка однозначно задає структуру та взаємозв'язок елементів насоса. На базі матричного представлення схеми заміщення формується система рівнянь математичної моделі.

Для побудови математичних моделей елементів відцентрових насосів в дослідженні використано наступні методики: побудовані на двовимірних моделях течії з використанням емпіричних коефіцієнтів; узагальнення результатів розрахунку течії в елементі на мікрорівні з використанням методів планування експерименту; узагальнення результатів фізичного експерименту для відцентрового насоса та розділ характеристик по елементах; використання аналогій із технічної гідромеханіки для простих елементів допоміжного тракту гідродинамічного насосного агрегату. Зміну параметрів течії в елементах відцентрового насоса задають компонентні рівняння, які описують розсіювання та накоплення гідравлічної енергії в типових елементах системи. Необхідно відмітити, що компонентні рівняння є нелінійними, бо всі гідравлічні елементи характеризуються нелінійною залежністю напору від витрати через елемент при типових турбулентних режимах течії. В загальному випадку цю залежність можна представити в наступному вигляді:

$$h = y + H = s \cdot q^2, \quad (1)$$

де h – втрати напору при проходженні робочої рідини крізь елемент; y – перепад напору при проходженні робочої рідини крізь елемент; q – витрата робочої рідини в елементі; $s = f(\zeta, F, q)$ – опір елементу; ζ – коефіцієнт гідравлічного опору елементу; F – характерні геометричні розміри.

Створені моделі типових елементів об'єднуються в бібліотеку для подальшого використання для побудови комплексної системи насоса.

Використовуючи теорію мереж і принципи макромоделювання, ми припускаємо течію робочої рідини осередненою поперек каналів. Це дає можливість одномірної його схематизації, при

якій розподіл або з'єднання різних потоків усередині насоса схематизується вузлами, а самі елементи насоса – гілками гідравлічної мережі. Таким чином, модель насоса можна задати графічно у вигляді схеми заміщення.

Зв'язок між елементами задають топологічні рівняння математичної моделі, які є записом законів збереження рідини (або перший закон Кірхгофа) та енергії для гідравлічних мереж (або другий закон Кірхгофа):

перший закон Кірхгофа

$$\sum_i q = Q_j, \quad (2)$$

другий закон Кірхгофа

$$\sum_k h = H_r, \quad (3)$$

де i – номери гілок схеми заміщення, що входять до j -го вузла; Q – витрата робочої рідини у j -ому вузлі; r – номер контуру в схемі заміщення; H – напір активних елементів у контурі r ; k – номери гілок схеми заміщення, що входять у контур r .

Таким чином, комплексна модель відцентрового насоса є системою компонентних (1) та топологічних рівнянь (2), (3). Ця система рівнянь загалом є нелінійною. Аналітичного рішення таких систем немає, тому для їх розрахунку потрібно використовувати алгоритмічні моделі. Для чисельного вирішення системи рівнянь комплексної математичної моделі обрано метод контурних витрат.

У третьому розділі сформульовано принципи виділення типових елементів насосів, розроблено ієрархію їх математичних моделей та викладено методику реалізації комплексної математичної моделі робочого процесу гідравлічної підсистеми відцентрових насосів.

Проведений системний аналіз наявних конструктивних схем гідродинамічних насосів виявив, що гідравлічна підсистема насосів є системою, яка складається з елементів, в яких робочій рідині енергія або передається, або розсіюється. Для адекватного моделювання робочого процесу необхідно враховувати взаємодію потоків, що проходять через елементи проточної частини та перетоки у допоміжному тракті. Також системний аналіз показав, що відцентрові насоси мають різноманітні структурні схеми та конструюються з значної кількості елементів, що мають різноманітні модифікації. Найсуттєвішою різницею в конструктивних схемах є структура гідравлічного тракту та тип насосної ступіні.

Типовими елементами, з яких формується комплексна математична модель відцентрового насоса, є канали для робочої рідини, створені конструктивними блоками системи, в яких робочій рідині передається або розсіюється енергія. Проведений огляд конструктивних схем відцентрових насосів дозволив виділити наступні типові елементи:

- робоче колесо та імпелери основного та покривного дисків робочого колеса;
- підвід;
- відвід (в тому числі і направляючий апарат);
- ущільнення (в тому числі радіальні та осьові щілини);
- отвори в елементах ротора та корпусу;
- зазори між дисками колеса та корпусом - пазухи;
- канали розвантажувальних пристроїв та перевідні труби;
- канали підшипників, що працюють на робочій рідині.

Виходячи з визначення типових елементів уся їх сукупність розділяється на два типи: пасивні та активні типові елементи. Елемент, в якому рідині передається енергія, є активним. Зрозуміло, що у відцентровому насосі активним елементом є робоче колесо (РК) та імпелери (Імп). Елемент, в якому відбувається розсіювання енергії робочої рідини, є пасивним. До пасивних типових елементів відцентрового насоса можна віднести підвід (П), напрямний апарат (НА), відвід (В), розвантажувальні пристрої (РПр), пазухи (передня – ПП, задня - ЗП), ущільнення (переднє – ПУ, заднє - ЗУ), порожнини між ротором и корпусом, канали та отвори в корпусі та роторі, щілини підшипників, що працюють на робочій рідині.

Специфіка будови та робочого процесу насосів обумовила наступні відмінності математичних моделей типових елементів та загальної математичної моделі насоса:

а) особливості моделей типових елементів:

- параметри робочого колеса та відводу залежать від розподілу гідравлічних характеристик – швидкості та тиску;
- наявність колової складової швидкості v_{ii} , що призводить до потреби брати до уваги взаємодію елементів;
- залежність параметрів елементів від значної кількості факторів;

б) нелінійність математичних моделей елементів комплексної моделі. Для більшості елементів відцентрового насоса залежність зміни напору H від витрати q є квадратичною.

с) наявність готових програмних продуктів і можливості їх застосування для отримання залежностей вхідних характеристик типових елементів від їх вхідних параметрів.

Вивчати структуру об'єкта і будувати його модель зручно з застосуванням блочно-ієрархічного підходу. Використання цього підходу дозволяє розглядати гідродинамічний насос з різним ступенем деталізації в залежності від потреб окремих етапів проектування. На першому рівні моделювання розглядаємо насос з малим ступенем деталізації та розподіляємо його на основні елементи проточного тракту – підвід, насосну ступінь, відвід та розвантажувальний пристрій (якщо він передбачений конструкцією). На другому рівні потрібно більш детально розглядати течію робочої рідини в насосі, коли насосна ступінь та розвантажувальний пристрій є

системою каналів, в яких перетворюється гідравлічна енергія. Ієрархічну схему відцентрового насоса представляємо у вигляді, наведеному на рис. 1.

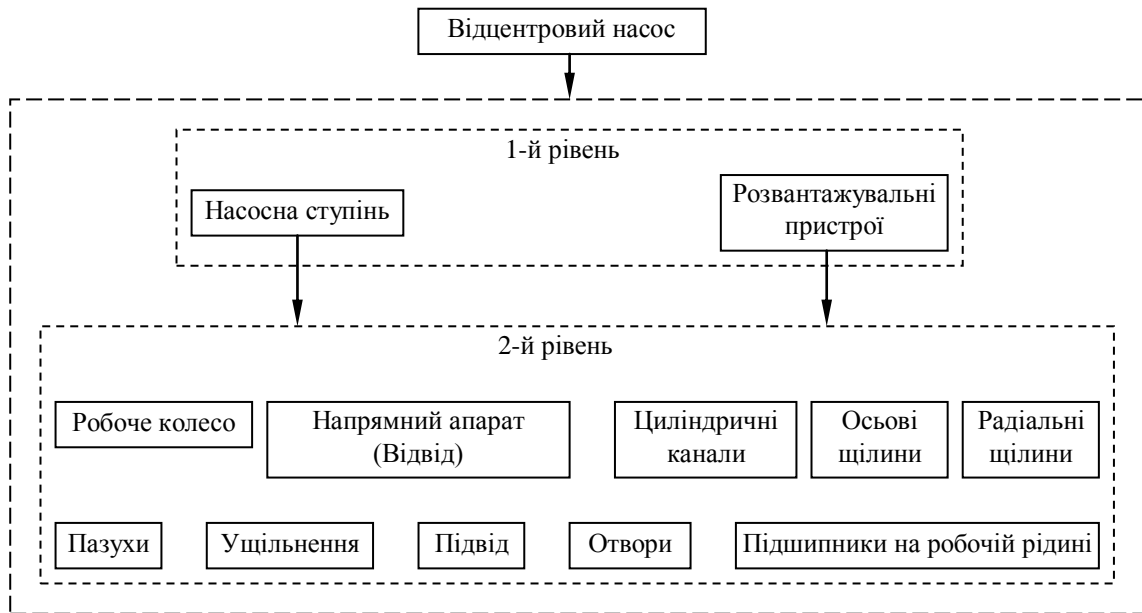


Рис.1 – Ієрархічні рівні комплексної моделі відцентрового насоса

Схема заміщення складних моделей першого рівня – насосної ступіні (НС) та розвантажувальних пристроїв – є гідравлічною мережею. Елемент схеми заміщення типових елементів другого рівня є гілкою мережі.

Насосна ступінь виконує основну функцію відцентрового насоса – перетворює механічну обертальну енергію ротору у гідравлічну енергію рідини. Тому основою комплексної моделі відцентрового насоса є модель насосної ступіні. Загальна її модель є 2-х контурною гідравлічною мережею (рис.2). В схемі заміщення, наведеній на рис. 2 а, гідравлічна мережа має один контур – витік через передню пазуху і переднє ущільнення; на рис. 2 б схема заміщення складається з двох контурів – до контуру витіку через передню пазуху і переднє ущільнення додається контур витіку через задню пазуху і заднє ущільнення. Одноконтурна насосна ступінь характерна для одноступеневих та двопоточних відцентрових насосів, двоконтурна – для багатоступеневих.

Введення імпелерів на робочому колесі з малим числом лопатей призводить до перерозподілу потоків робочої рідини в пазухах, що змінює баланс енергії насосної ступіні. Схема заміщення такої насосної ступіні наведена на рис. 3.

Схема заміщення багатоступеневого насоса будується послідовним з'єднанням ступіней (рис. 4 а). Для двухпоточних насосів схема заміщення складається з паралельно з'єднаних насосних ступіней (рис. 4 б).

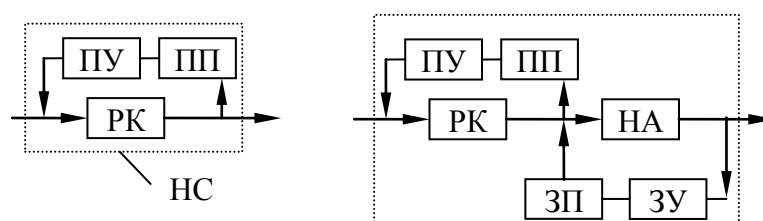


Рис.2 – Загальна модель насосної ступіні:

а – одноконтурна схема, б – двоконтурна схема

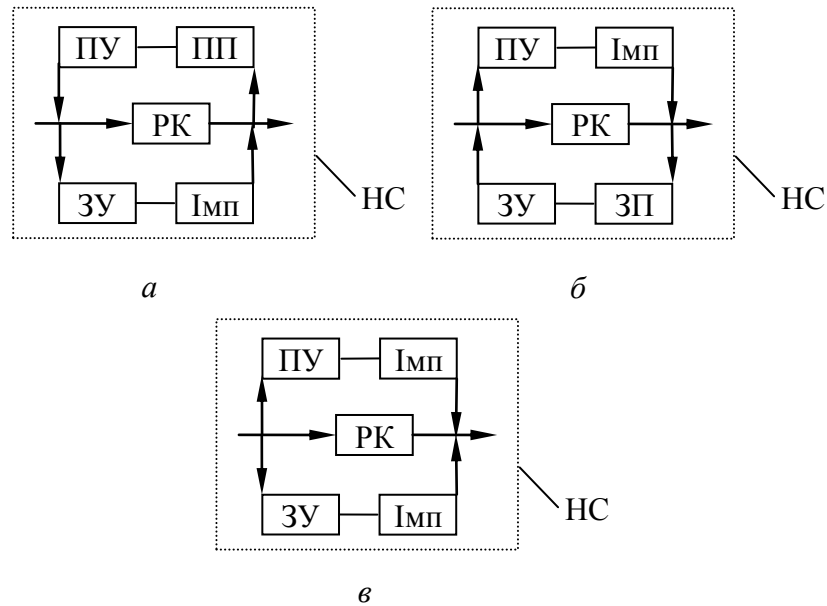


Рис.3 – Схема заміщення насосних ступіней з імпелерами:

а – імпелер встановлено у задній пазусі; б – імпелер встановлено у передній пазусі;

в – імпелер встановлений у обох пазухах

Вхідні дані для розрахунку параметрів елемента формуються у вигляді інформаційного блоку, що має наступні складові:

- ім'я елемента – текстовий тип;
- номер математичної моделі типового елемента – цілий тип;
- номер гілки, котрій належить типовий елемент – цілий тип;
- характерні параметри – 12 реальних чисел.

В якості характерних параметрів виступають геометричні характеристики елемента, динамічні характеристики і т.п. Кожна математична модель характеризується своїми параметрами. Математична модель типового елемента може мати не більше 12 характерних параметрів.

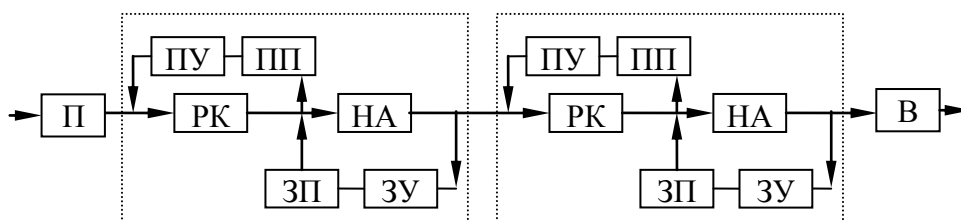


Рис. 4 – Схема заміщення відцентрового насоса:

а – з послідовним з'єднанням насосних ступіней; б – з паралельним з'єднанням насосних ступіней

За схемою заміщення насоса записуються закони Кірхгофа та компонентні замикаючі рівняння. В результаті ми отримуємо систему рівнянь, що описує розподіл витрат та напору по всім елементам схеми заміщення, що відображує структуру і склад моделі. Для чисельної реалізації математичної моделі відцентрового насоса найбільш зручно записувати систему рівнянь (1)-(3) в матричному вигляді:

$$A \cdot q = Q,$$

$$B \cdot H = B \cdot S \cdot |q| \cdot q,$$

де A – матриця з'єднань; Q – вектор витрат робочої рідини у вузлах схеми; q – вектор витрат рідини, що транспортується, в гілках схеми; B – матриця контурів; H – вектор діючих на гілках напорів; S – діагональна матриця опорів елементів на гілках мережі; $|q|$ – діагональна матриця абсолютних значень витрати в гілках.

Для чисельного вирішення сформованої системи нелінійних рівнянь комплексної моделі проведено часткову лінеаризацію рівнянь та ітераційну процедуру.

Запропонована методика моделювання робочого процесу відцентрових насосів досліджує перерозподіл потоків робочої рідини та гідравлічної енергії в насосі на основі використання законів збереження, записаних для всієї гідравлічної підсистеми насоса. Це дозволяє автоматично в результаті розрахункового дослідження отримати баланс енергії насоса. При цьому результати

розрахунку не залежать від попередньо обраного напрямку течії в каналах насоса.

Проведене тестування комплексної моделі на аналітичному рішенні для простої схеми заміщення показало адекватність обраної математичної моделі. Співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними для консольного насоса дозволило оцінити, що розроблена методика на інтервалі $0,7Q_p \dots 1,3Q_p$ (Q_p – робоча витрата) дає результати з інженерною точністю. Таким чином запропонована комплексна математична модель робочого процесу гідродинамічних насосів дозволяє отримувати їх енергетичні характеристики з інженерною в робочому діапазоні насосів.

У четвертому розділі наведена методика практичного використання розробленої комплексної моделі та оцінена можливість її використання для розрахунку енергетичних характеристик відцентрових насосів з малою кількістю лопатей ($z \leq 3$).

Методика проведення розрахункового дослідження за допомогою розробленої комплексної моделі передбачає виконання наступних дій:

- формулюється мета дослідження: вибір конструктивної схеми відцентрового насоса за даними технічного завдання або оцінка енергетичних параметрів наявної конструктивної схеми;
- якщо потрібно обрати оптимальну конструктивну схему, задаються обов'язкові вхідні параметри – робоча витрата Q_p (м³/год) та напір H_p (м). Також в діалоговому режимі з користувачем розробленої програми можна задати додаткові параметри: n – частота обертання, об/хв.; $\Delta h_{кав}$ – кавітаційний запас, м; i – кількість ступіней; j – кількість потоків;
- за вхідними параметрами розраховується коефіцієнт швидкохідності n_s та кавітаційний коефіцієнт швидкохідності C для ряду значень частоти обертання n , кількості ступіней i та кількості потоків j . Вся кількість отриманих варіантів у вигляді таблиці виводиться на екран для того, щоб користувач міг обрати найбільш підходящий варіант;
- обраний варіант дає інформацію про кількість потоків та ступіней, за якою формується схема заміщення відцентрового насоса;
- обирається тип моделі робочого колеса: за заданою характеристикою, ім'я файлу, з якого вводиться характеристика, або розрахунок геометричних параметрів, потрібних для оцінки енергетичних характеристик. Обирається тип підводу, відводу, ущільнень та допоміжні елементи, наприклад, імпелери. Розраховуються геометричні параметри обраних елементів в інтерактивному режимі, коли користувач може самостійно задавати частину параметрів;
- за отриманими геометричними параметрами проводимо розрахунок енергетичних характеристик, які виводяться на екран у вигляді таблиці, графіка та зберігаються в файлі даних. Це дає користувачу змогу візуально оцінити якість конструкції. Якщо прогнозовані за комплексною моделлю характеристики обраної конструктивної схеми задовольняють вимогам технічного завдання, розрахунок можна припинити. В іншому випадку користувач може обрати тип змін: зміна

геометричних параметрів обраних типових елементів, зміна типу елемента (обирається елемент, тип якого змінюють, та розраховується його геометрія зі змінами до конструкції сумісних елементів), обирається новий варіант конструктивної схеми. Після вводу змін та розрахунку геометрії виконується повторний розрахунок енергетичних характеристик.

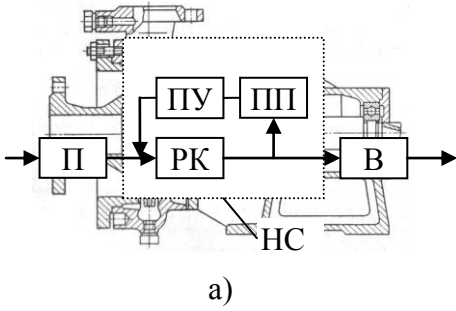
В результаті проведеного розрахункового експерименту отримуємо інформацію про структуру відцентрового насоса, тип його елементів, їх геометричні параметри та характеристики такого насоса. За результатами розрахунку системи рівнянь комплексної моделі відцентрового насоса отримуємо значення витрат та зміни напору у елементах. Далі ведеться розрахунок споживаної потужності та ККД насоса. В першу чергу при розрахунку характеристики насоса за запропонованою методикою отримуємо дані про роботу насоса на оптимальному режимі. Далі ці дані використовуються для розрахунку характеристик при недовантаженні та перевантаженні від Q_{min} до Q_{max} .

Створена комплексна модель була реалізована у вигляді програми для ПЕОМ. Для використання створеного засобу наведено опис файлів вхідних даних та керівництво користувача.

Було проведено співставлення отриманих результатів розрахунку за розробленою методикою з наявними даними експериментальних досліджень характеристик консольного насоса та насоса з однолопатевим робочим колесом, яке показало сходиність результатів з інженерною точністю в робочому діапазоні насосів.

Розроблена комплексна модель характеризується легкістю введення початкових даних для розрахунку енергетичних характеристик відцентрових насосів. Це дозволяє досить швидко (за секунди) розраховувати вплив зміни геометричних параметрів та типу елементів на характеристики насосів. Так для консольного насоса K90/35, конструктивна схема та схема заміщення якого наведені на рис. 5, було проведено оцінку роботи при зміні геометричних розмірів переднього ущільнення. Проводився розрахунок параметрів насоса, коли переднє ущільнення зношується та його зазор збільшується втричі від 0,25 мм до 0,75 мм. На рис. 6 наведено співставлення характеристик при вказаних значеннях зазору.

Також для насоса було оцінено вплив на характеристики зміни типу відводу з спірального на кільцевий. Кільцевий відвід мав ті ж основні геометричні розміри, що й спіральний. Як і можна було очікувати, зміна типу відвода не змінила потужність насоса, а тільки напір та ККД. Результати співставлення характеристик насоса зі спіральним та кільцевим відводами наведено на рис. 7 та 8, де — -спіральний відвід, - - - - - кільцевий відвід.



б)

Рисунок 5 – Конструкція (а) та схема заміщення (б) насоса К90/35.

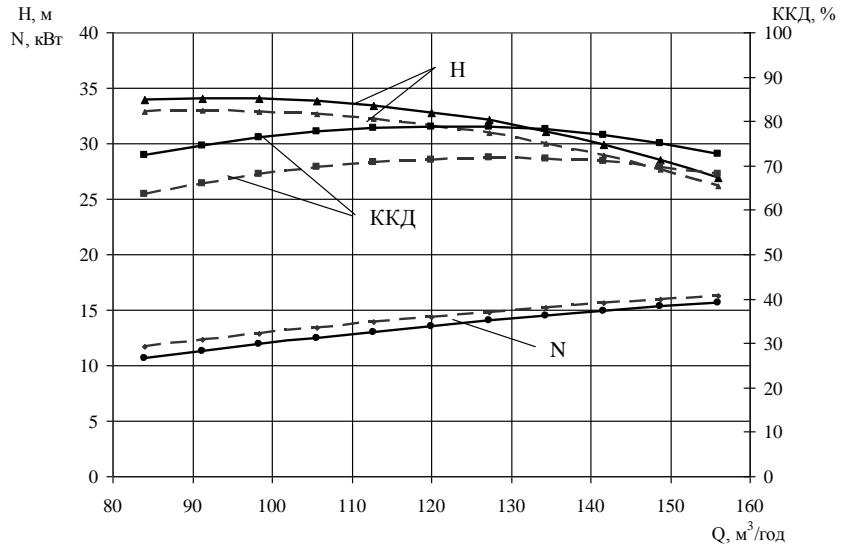


Рисунок 6 – Співставлення характеристик насоса К90/35 при зміні ширини зазору переднього ущільнення (б):
 — $b=0,25 \mu\text{m}$, - - - - - $b=0,75 \text{ mm}$.

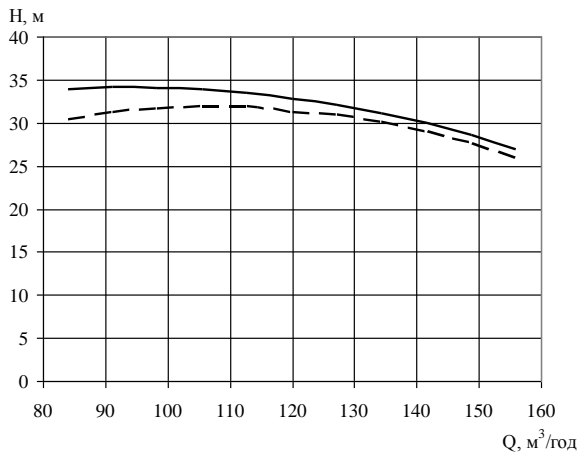


Рисунок 7 – Співставлення напора насоса К90/35 при зміні типу відводу.

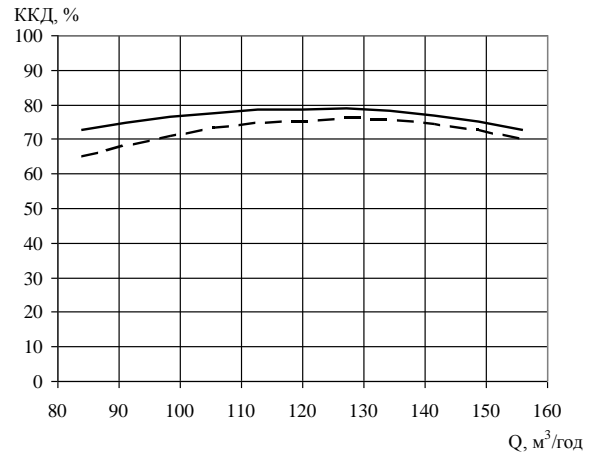


Рисунок 8 – Співставлення ККД насоса К90/35 при зміні типу відводу.

ВИСНОВКИ

Розроблено комплексну математичну модель робочого процесу гідравлічної підсистеми відцентрових насосів, яка є інструментом для раціонального вибору конструктивної схеми насоса та реалізації науково-методичного забезпечення блочно-модульного проектування передбаченого концепцією розвитку насособудування. Комплексна модель дозволяє отримувати енергетичні характеристики гідродинамічних насосів та забезпечує достатню точність отриманих результатів, її

використання автоматизує початкові етапи проектування та зменшує частку фізичного експерименту під час доводки створеної конструкції.

В результаті проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

– з проведеного аналізу сучасного стану проектування відцентрових насосів зроблено висновок про потребу дослідження робочого процесу насосів на базі комплексної математичної моделі, яка дозволяє розглядати його як систему та врахувати вплив на гідродинамічні параметри не тільки елементів проточної частини, а й каналів допоміжного тракту;

– в результаті огляду сучасних методик моделювання гідродинамічних процесів у складних технологічних системах зроблено висновок, що використання підходів макромодельовання дозволяє досягти поставленої мети щодо створення комплексної моделі робочого процесу відцентрових насосів, в якій враховується вплив елементів проточного тракту на характеристики один одного та на загальні характеристики насоса;

– системний аналіз наявних конструкцій відцентрових насосів виявив необхідність використання блочно-ієрархічного підходу при розподілі насоса на елементи та формуванні моделі гідродинамічного насоса в цілому;

– в результаті проведеного дослідження розроблено принципи та методичні рекомендації щодо розподілу конструкції відцентрового насоса на типові елементи, моделі яких дозволяють сформулювати комплексну модель насоса;

– з узагальнених математичних моделей типових елементів створено бібліотеку моделей елементів комплексної моделі, що дозволяє проводити розрахункове дослідження різних конструктивних схем насосів та при потребі швидко змінювати схемне рішення та елементний склад досліджуваного об'єкту;

– розроблена комплексна модель гідродинамічних насосів дозволяє автоматизувати розрахунок балансу енергії завдяки використанню законів збереження рідини та енергії при формуванні моделі;

– проведене тестування розробленої комплексної моделі та співставлення її результатів з експериментальними даними показало її адекватність у зоні робочих режимів та можливість використання для розрахунку енергетичних характеристик відцентрових насосів;

– використання створеної в результаті проведеного дослідження методики моделювання на етапі вибору схемного рішення дозволяє зменшити вплив суб'єктивних факторів при виборі конструктивної схеми відцентрового насоса, спирається на раціональні засади під час виконання цього процесу, бо дозволяє комплексно оцінити енергетичні характеристики різних варіантів схемного рішення та зменшити об'єм робіт з вдосконалення насоса;

– запропонована методика моделювання роботи відцентрового насоса реалізована у вигляді програми, що дозволило автоматизувати процес вибору конструктивної схеми насоса, етапи

проектування та отримати інформацію про геометрію насоса для проведення подальших більш детальних досліджень;

– розроблена комплексна модель робочого процесу гідравлічної підсистеми відцентрового насоса дає можливість оптимізації конструктивної схеми відцентрових насосів;

– розроблена методика моделювання робочого процесу відцентрових насосів доповнює традиційну методику проектування гідродинамічних насосів та дозволяє розраховувати характеристики насосів, у тому числі з робочими колесами з малою кількістю лопатей;

– розроблена методика моделювання робочого процесу відцентрових насосів на основі модельних блоків, що забезпечує її використання як одного з інструментів реалізації науково-методичного забезпечення блочно-модульного принципу проектування гідродинамічних насосів, передбаченого концепцією розвитку насособудування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Алексенко О.В., Неня В.Г. Методические основы проведения вычислительного эксперимента. // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. наук. трудов. Вып.129. Ч.2. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – с. 393-399.

2. Неня В.Г., Алексенко О.В., Смертьяк С.М. Основы методики инженерного мониторингу гідравлічних мереж. // Вестник НТУУ "КПИ". Машиностроение. Вып. 42. Т. 2. – К.: Изд-во НТУУ "КПИ", 2002. – с. 130-133.

3. Алексенко О.В., Неня В.Г. Основы методики макро моделирования центробежных насосов. // Вісник СумДУ, вип. 13 (59). – Суми: Вид-во СумДУ. – 2003. – С. 156-161.

4. Алексенко О.В., Неня В.Г. Прогнозирование характеристик центробежных насосов на основе макро моделирования. // Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання. Праці міжнарод. наук.-техн. конф./ НАН України та ін. – Харків: Ін-т проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України, 2003. – Т. 2 – С. 543-548.

5. Алексенко О.В., Евтушенко А.А., Яхненко С.М. Насосный эффект дисков рабочего колеса центробежного насоса. // Технологія і техніка друкарства. Зб. наук. праць. Вип. 2-3 (4-5). – К.: Вид-во НТУУ "КПИ", 2004. – С.88-93.

6. Алексенко О.В., Неня В.Г. Построение функциональных блоков для макро модели центробежного насоса. // Промислова гідравліка і пневматика, № 4 (6). – Вінниця: Вид-во ВДАУ.– 2004. – С. 21-25.

АНОТАЦІЯ

Алексенко О.В. Розробка методів розрахунку та дослідження робочого процесу лопатевих насосів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. - Сумський державний університет, Суми, 2006 р.

У дисертації наведені результати дослідження щодо розробки методики побудови комплексної математичної моделі відцентрового насоса, яка дозволяє розглядати його як складну систему та врахувати вплив на характеристики як елементів проточної частини, так й каналів допоміжного тракту. Комплексна модель розроблена на основі підходів макромодельовання та теорії мереж, що дозволило врахувати взаємодію елементів насоса та на єдиній методичній основі реалізувати моделі різних блочно-ієрархічних рівнів побудови макромоделі насоса.

Розроблена методика може застосовуватися для вибору конструкції насоса та вводить раціональні засади при виконанні цього процесу. Методика створена згідно з концепцією розвитку насособудування та дозволяє реалізувати блочно-модульний принцип проектування насосів.

Ключові слова: комплексна модель, розрахунковий експеримент, макромодель, типові елементи, відцентровий насос, методика розрахунку.

SUMMARY

Alexenko O.V. The development of the methods of calculation and investigation of the blades pump working process. – The manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science in speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydraulic and pneumatic units. Sumy State University, Sumy, 2006.

In dissertation are expounded the results of development of the method of complex mathematical model centrifugal pump construction. Complex model allows to examine centrifugal pump as difficult system and to take into account influence on characteristics of elements of running part and channels of auxiliary ducts. A complex model is developed on the basis of approaches of macromodeling and theory of hydraulic networks. The pump macromodel is based on block-hierarchical principle of the construction.

The developed method of modeling can be used for the choice of the pump schema. This method is developed pursuant to principles of conception of the pump development and it is realized the block-module principle of pump designing.

Keywords: complex model, calculation experiment, macromodel, typical elements, method of centrifugal pump calculation.

АННОТАЦИЯ

Алексенко О.В. Разработка методов расчета и исследования рабочего процесса лопастных насосов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 - гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. - Сумский государственный университет, Сумы, 2006 г.

На данный момент основным принципом развития насосостроения есть переход к блочно-модульному принципу конструирования на основе внедрения передовых методик проектирования. Это требует решения широкого круга вопросов: разделение проточной части насоса и конструкции в целом на блоки и модули, из набора которых дальше будет формироваться насосный агрегат; создание базы данных блоков и модулей; разработка удобного инструмента прогнозирования характеристик насоса. Современные тенденции развития гидромашиностроения требуют широкого внедрения расчетного эксперимента для повышения качества проектирования.

Обзор методик проектирования насосов позволил сделать вывод об отсутствии комплексной модели центробежного насоса. Микромоделирование в данное время не позволяет создавать комплексную модель гидродинамического насоса. Переход на макроуровень моделирования позволяет решить эту проблему. Макромодель опирается на базу математических моделей элементов системы и позволяет на основе единого подхода исследовать разные конструктивные схемы насосов, что ускорит процесс их проектирования и позволит разработать механизм поиска рационального исполнения с точки зрения реализации технического задания.

В диссертации приведены результаты исследования по разработке методики построения комплексной математической модели центробежного насоса, которая позволяет рассматривать его как систему и учитывать влияние на энергетические характеристики не только элементов проточной части, но и каналов вспомогательного тракта. Комплексная математическая модель разработана на основе подходов макромоделирования и теории сетей. Графически комплексная модель представляет собой схему замещения, которая однозначно задает структуру и связь элементов насоса.

Проведенный системный анализ конструкций центробежных насосов позволил сформулировать требования к типовым элементам насоса и к их математическим моделям. Также анализ показал, что для реализации поставленной задачи необходимо использовать блочно-иерархический принцип построения комплексной модели. Это позволило при расчетном эксперименте использовать модели различных уровней детализации в зависимости от потребностей конкретных этапов проектирования.

Для построения математических моделей элементов центробежных насосов в исследовании использованы следующие методики: обобщение результатов расчета течения в элементе на микроуровне с использованием методов планирования эксперимента; двумерные модели с использованием эмпирических коэффициентов; обобщение результатов физического эксперимента и разделение характеристик по элементам; использование аналогий из технической гидромеханики для простых элементов вспомогательного тракта насоса. Из моделей типовых элементов сформирована библиотека, которая позволяет исследовать различные конструкции и легко вносить изменения в исследуемую схему.

Уравнения комплексной математической модели формируются с использованием законов сохранения жидкости и энергии, что гарантирует точность автоматического составления баланса энергии насоса и обеспечивает адекватность модели исследуемым физическим явлениям.

В результате проведенного исследования была создана методика моделирования рабочего процесса гидравлической подсистемы центробежного насоса. Разработанная методика реализована в виде программы. Результаты тестирования программы показали возможность ее применения для автоматизации начальных этапов проектирования.

Данный инструмент рекомендуется использовать для выбора конструктивной схемы центробежного насоса, что создает рациональные подходы при выполнении этого процесса, так как позволяет оценивать энергетические характеристики разных вариантов схемного решения. В результате выполненных расчетов получаем информацию об энергетических характеристиках выбранной конструкции и ее геометрии, которую можно использовать для дальнейшего более детального исследования. Оценка энергетических параметров выбранного схемного решения позволяет экономить время и материальные ресурсы при доводке конструкции насоса, что делает разработанную методику ценной для практики проектирования центробежных насосов.

Комплексная модель центробежного насоса разработана согласно концепции развития насосостроения и реализует блочно-модульный принцип проектирования центробежных насосов.

Ключевые слова: комплексная модель, расчетный эксперимент, макромодель, типовые элементы, центробежный насос, методика расчета.