

Баранова Ірина Володимирівна

УДК 621.65

**СТВОРЕННЯ засобу ведення розрахункового експерименту в насособудуванні
на базі просторової моделі потенціальної течії**

05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2002

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

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Неня Віктор Григорович,
заступник завідувача кафедри
основ проектування машин,
Сумський державний університет.

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор
Гнесін Віталій Ісайович,
заступник директора з наукової роботи
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М.Підгорного НАН України

кандидат технічних наук, доцент
Кочевський Микола Миколайович,

начальник відділу АСУВ
ВАТ “Сумський завод “Насосенергомаш”.

Провідна установа - Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
кафедра гідропневмоавтоматики і гідравліки (м. Київ).

Захист дисертації відбудеться 20 червня 2002 р. о 14⁰⁰ годині 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 ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету. Автореферат розісланий 20.05.2002 р.

**Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради**

Савченко Є.М.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Насособудування - одна із галузей промисловості, в якій наша держава може створювати конкурентноздатну продукцію. В ринкових умовах важливе значення набуває подальше підвищення показників якості - забезпечення високої надійності і ефективності роботи насосного обладнання, скорочення строків його проектування, зниження собівартості та металомісткості конструкцій. Це потребує нових технічних рішень і, відповідно, проведення значних обсягів науково-дослідних робіт (НДР). Останнє можливо реалізувати у прийнятні строки при умові забезпечення суттєвого скорочення трудомісткого та високовартісного фізичного експерименту шляхом його заміни розрахунковим. Для реалізації такої заміни необхідні нові високоефективні засоби проведення розрахункових досліджень у насособудуванні. Проблема створення засобів ведення розрахункових досліджень в гідромашинобудуванні є предметом підвищеної уваги дослідників вже тривалий час. На сьогодні існують різні моделі руху рідини, які є теоретичною базою для математичного моделювання робочого процесу в гідромашинах. Розробленими та широко впровадженими в практику є двовимірні та квазіпросторові моделі. Стосовно гідромашинобудування розроблена просторова модель руху нестисливої рідини в періодичних каналах лопатевих систем та дослідження проточних частин (ПЧ) гідромашин в цілому. Для розрахунку, в останньому випадку, потік у вхідному та вихідному перерізах вважається рівномірним та незакрученим, відповідно, достатньо задавати лише значення нормальної складової швидкості у вказаних перерізах ПЧ. Недоліками існуючих засобів для ведення розрахункових досліджень стосовно лопатевих гідромашин є або їх надто велика спрощеність, що не дозволяє отримувати результати задовільної для практики точності, або вузькоспеціалізована направленість, що різко обмежує сферу їх використання на практиці.

Недоліки існуючих засобів ведення розрахункових досліджень в гідромашинобудуванні на сьогодні найбільш неприйнятні стосовно насособудування, а саме лопатевих насосів. На привод останніх витрачається до п'ятнадцяти відсотків електроенергії, яка споживається країною в цілому, і забезпечення якісної роботи останніх є ваговою науково-технічною задачею. Крім того, згідно впроваджуваної концепції розвитку насособудування в Україні, однією з основних задач в цій галузі є зменшення кількості вузькоспеціалізованого насосного обладнання шляхом розширення числа його модифікацій на основі обмеженої кількості базових конструкцій. Реалізувати таку задачу можливо при використанні блочно-модульного способу конструювання насосів. Але в

цьому випадку стає необхідним поділ проточних частин насосів на окремі елементи і самостійне відпрацювання останніх до рівня потрібних показників їх якості. Для вирішення такої задачі існуючі засоби ведення розрахункових досліджень в гідромашинобудуванні є або малоефективними, або загалом непристосованими. Останнє стосується, зокрема, існуючої розробки моделі просторової течії нестисливої рідини, реалізованої у вигляді засобу ведення розрахункового дослідження течії в ПЧ гідромашин в цілому, без поділу її на окремі елементи.

Таким чином, задача створення засобу ведення розрахункового експерименту в насособудуванні на основі моделі просторової потенціальної течії, який би дозволяв вести відпрацювання окремих елементів проточних частин лопатевих насосів до забезпечення необхідного рівня показників їх якості в роботі, є актуальною, а її вирішення – доцільним і своєчасним.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом НДР Сумського державного університету (СумДУ). Основні дослідження виконані в рамках держбюджетних НДР по темах (замовник - Міністерство освіти і науки України): 80.13.03.94-96 д/б “Дослідження системних ефектів в гідродинамічних насосних установках” (номер державної реєстрації 0195U000361), 80.13.06.97-99 д/б “Дослідження робочого процесу свердловинних турбонасосних агрегатів на газонасичених та високов'язких нафтах” (0197U016595), 80.01.04.00-02 д/б “Дослідження нетрадиційних турбомашин і систем для вирішення енергетичних та екологічних проблем” (0100U03214). Автором в рамках цих НДР проводились дослідження, направлені на створення нових засобів ведення розрахункових досліджень в галузі насособудування.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення засобу ведення розрахункового експерименту в насособудуванні на основі математичного моделювання просторової потенціальної течії, який дозволяє визначати характеристики течії рідини в проточній частині насоса та її окремих елементах і забезпечує, при суттєвому скороченні багатовартісного фізичного експерименту, можливість їх достовірної оцінки на стадії проектування, або при модернізації існуючого насосного обладнання.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

- здійснити постановку крайової задачі визначення параметрів гідродинамічного поля для просторових потенціальних течій, характерних для елементів проточних частин насосів при їх блочно-модульному конструюванні;
- запропонувати методику розв'язання поставленої крайової задачі, яка враховує відповідні граничні умови;
- для отримання коректного рішення забезпечити методику моделювання необхідними додатковими умовами;
- розробити незалежну від типу та складності математичної моделі процедуру розрахунку інтегральних та усереднених параметрів течії в проточній частині насоса;
- для реалізації алгоритму розрахунку розробити методику побудови геометричної моделі ПЧ, яка забезпечує незалежність використання геометричної інформації від конструктивної схеми ПЧ, розробити бібліотеку типових елементів проточних частин ЛГМ;
- чисельно реалізувати на основі створених математичної та геометричної моделей алгоритм і програму рішення крайової задачі визначення параметрів гідродинамічного поля в контрольних перерізах та на визначених поверхнях;
- перевірити відповідність розробленого засобу ведення розрахункового експерименту в насособудуванні зовнішнім вимогам до нього.

Об'єкт дослідження – робочий процес динамічних насосних агрегатів.

Предмет дослідження – засоби вивчення структури та визначення інтегральних параметрів течії рідини в проточній частині лопатевих насосів.

Методи дослідження. Поставлені задачі дослідження вирішувались методом чисельного розв'язання рівнянь просторового руху нев'язкої нестисливої рідини з подальшою перевіркою отриманих результатів шляхом їх співставлення з результатами відомих аналітичних рішень, а також експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

- сформульована задача для внутрішніх течій в елементах проточних частин лопатевих гідромашин, показана можливість її зведення, в математичному плані, до задачі типу Гільберта;
- запропонована та доведена можливість використання умови соленоїдальності вихрового поля для забезпечення замкненості математичної моделі внутрішніх течій в елементах проточних частин лопатевих гідромашин;
- визначено, що забезпечення універсальності рішення виділеного типу крайових задач в гідродинамічному та геометричному аспектах потребує обов'язкового виконання умови однорідності математичної моделі, яка використовується;
- встановлені принципи побудови універсальної геометричної моделі проточної частини лопатевих гідромашин для реалізації розрахунку просторового потоку та створено генератор розрахункової сітки, що їх реалізує;
- побудована та чисельно реалізована на основі методу дискретних вихорів нова модель тривимірної течії рідини в проточній частині лопатевої гідромашини.

Практичне значення одержаних результатів:

- розроблена програма для ПЕОМ вирішення крайової задачі визначення параметрів гідродинамічного поля просторових потенціальних течій;
- визначена та реалізована у вигляді програмного продукту для ПЕОМ процедура розрахунку інтегральних та усереднених параметрів течії на базі відомих параметрів її гідродинамічного поля;
- створена електронна бібліотека типових елементів проточних частин лопатевих гідромашин, наявність якої дозволяє використовувати уніфіковану процедуру побудови геометричних моделей вказаних проточних частин різного конструктивного виконання;
- створено новий засіб ведення розрахункового експерименту в насособудуванні, який дозволяє, при суттєвому скороченні обсягів високовартісного фізичного експерименту, вести ефективно поелементне відпрацювання проточних частин лопатевих насосів.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємствах України (ВАТ “Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування” (ВНДІАЕН), ВАТ “Сумське МНВО ім. Фрунзе”), у навчальному процесі (СумДУ).

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, що опубліковані у співавторстві, пошукувачем виконано: вивід рівнянь математичної моделі, розробка методики формування дискретної моделі та її чисельна реалізація [1]; розробка програми розрахунку і проведення обчислень для визначення впливу способу установки занурювального насоса на його характеристики [3]; розробка принципів задавання реальної початкової інформації для розрахунку течій в насосах, алгоритму та програми розрахунку з урахуванням вказаних положень [4, 6]; методика формування однорідних математичних моделей течій та геометричних моделей проточних частин [7]; реалізація ведення проектів геометричних моделей [8]. Постановка задачі проведена здобувачем разом з науковим керівником. Розробка

алгоритму розрахунку та методики проведення чисельного експерименту, аналіз, трактування і узагальнення результатів проведені здобувачем здебільшого самостійно і частково – разом з науковим керівником та співавторами публікацій.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції "Удосконалення енергетичних і транспортних турбоустановок методами математичного моделювання" (м. Харків, 1994 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції "Насоси-96" (м. Суми, 1996 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Гідромеханіка, гідромашини, гідропривід і гідропневмоавтоматика" (м. Москва, 1996 р.); на I-VI науково-технічній конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" (м. Київ, 1996, 1998, 2000 рр.), (м. Черкаси, 1997 р.), (м. Суми, 1999 р.), (м. Харків, 2001 р.); на VII Міжнародному симпозіумі "Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики" (м. Феодосія, 1997 р.); на науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів СумДУ (щорічно з 1994 по 2001 рр.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображені у 9 публікаціях, з яких 5 – статті у фахових виданнях ВАК України, 4 – доповіді на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок. Дисертаційна робота містить 46 рисунків, із яких 10 рисунків на 8 окремих сторінках, 3 таблиці по тексту, 2 додатки на 7 сторінках, список використаних літературних джерел із 137 найменувань на 13 сторінках.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтована доцільність створення нових засобів ведення розрахункових досліджень у гідромашинобудуванні, в цілому, та в насособудуванні, зокрема. Наведена загальна характеристика дисертації.

У першому розділі наводяться результати аналізу існуючих моделей течії рідини в проточній частині лопатевих гідромашин (ЛГМ), описується сучасний стан розрахунків таких течій, аналізуються можливості, з їх допомогою, підвищення показників якості насосів на стадії проектування.

Кожна модель потоку характеризується певною сумою припущень та умовностей, сукупність яких впливає на точність проведення розрахунків та отриманих за їх допомогою результатів. Результати досліджень, проведених вітчизняними (Стржелецький М.Н., Боровський Б.Й.) та закордонними (Scott C.J., Holzhtuter E.) вченими, доводять, що при забезпеченні на практиці відповідних вісесиметричних граничних умов для потоку рідини, достатню точність моделювання забезпечують дворозмірні моделі на базі течії ідеальної рідини. Однак вісесиметричні умови на границях вдається забезпечувати далеко не завжди.

Крім того, згідно концепції розвитку насособудування в Україні передбачається застосування блочно-модульного принципу конструювання насосів (формування їх ПЧ окремими елементами). В цьому випадку не вдається витримати вказані граничні умови у контрольних перерізах між окремими елементами ПЧ. Дослідження Вертячих О.В., Тімшина А.І. та інших показують, що за окремими елементами ПЧ лопатевих насосів має місце суттєва нерівномірність потоку. Відповідно існує потреба у розробці просторових моделей течії.

Розрахунки просторової течії стосовно проточної частини гідромашин в цілому вели Вікторов Г.В., Моргунов Г.М., Биков А.О., Косторной С.Д. Однак представлені в їх роботах існуючі засоби розрахунку просторової потенціальної течії жорстко прив'язані до окремих видів течій (наприклад, в періодичних, кільцевих каналах) або окремих типів геометричних моделей (спіральна камера, відвідний пристрій, лопатева ґратка, осьова турбіна).

Для подолання цих перешкод виникла потреба у розробці таких засобів розрахунку, які б дозволяли враховувати взаємний вплив елементів ПЧ, дозволяли б у рамках однієї дискретної моделі застосувати їх до ПЧ різних типів та проводити модифікацію геометрії ПЧ без модифікації програмного продукту і враховувати реальні граничні умови для розрахунку окремих елементів ПЧ. Задовольнити цим вимогам можна при відокремленні функціональної та геометричної частини дискретної математичної моделі, забезпеченні уніфікованого обміну даними між ними. До теперішнього часу ця задача залишалася невирішеною.

У другому розділі викладена постановка задачі створення засобу ведення розрахункового експерименту для дослідження робочого процесу лопатевих насосів та наведено обґрунтування методів її вирішення.

Розглядається стаціонарна течія нев'язкої нестисливої рідини в каналі довільної форми об'єму W , що обмежений поверхнею SS , з відомим розподіленням витратної складової швидкості V_n на поверхні SS та колової складової швидкості V_u у вхідному і вихідному перерізах.

Математична модель розрахунку складається з умови нерозривності середовища та потенціальності течії, тобто для будь-якої точки потоку вважаються справедливими рівняння для швидкості \vec{V}

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{V} = 0, \\ \operatorname{rot} \vec{V} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Відповідно, поверхня SS складається з непроникних поверхонь ST та двох проникних:

вхідного S_1 та вихідного S_2 перетинів. На поверхні SS виконуються граничні умови, тобто швидкості мають значення на границях V_n^* та V_u^* :

$$V_n = V_n^* \Big|_{S_\Sigma}, \quad V_u = V_u^* \Big|_{S_1, S_2}, \quad (2)$$

де $V_n^* = 0$ - на нерухомих непроникних границях; $V_n^* = U_n$ - на рухомих непроникних границях; $V_n^* = V_{n1}$, $V_u^* = V_{u1}$ та $V_n^* = V_{n2}$, $V_u^* = V_{u2}$ - на вхідному та вихідному перерізах відповідно.

Для теоретичного вирішення поставленої задачі (1-2) вибрано метод зведення вихідної моделі у диференціальній формі до еквівалентних граничних інтегральних рівнянь. Використання такого підходу передбачає наявність інтегрального представлення досліджуваного фактору від граничних умов на поверхнях розрахункової схеми, підстановку його в граничні умови і чисельну дискретизацію отриманих таким чином граничних інтегральних рівнянь.

Для перевірки обраного підходу та отриманих результатів розрахунку, стосовно напрямного апарату осьового насосу, проведено експериментальне дослідження поля швидкості за напрямним апаратом. Експериментальний стенд дозволяв проводити енергетичні випробування та визначення усередненого моменту швидкості потоку. Методика проведення експериментальних досліджень не відрізнялась від типової методики експериментальних досліджень динамічних насосів.

У третьому розділі наведено теоретичне рішення крайової задачі, результати розробки науково-методичних основ, які забезпечують дотримання умови однорідності моделі, та результати чисельної реалізації рішення даної задачі.

Для побудови інтегрального представлення об'єм W умовно поділимо на дві частини -

центральну W_1 (ядро потоку), та нескінченно тонку пристінну область W_2 . Потік рідини у всій розрахунковій області, окрім нескінченно тонкого пристінного шару, приймається потенціальним. Тоді в центральній частині об'єму виконується система (1). Вплив на потік елементів обтікання та граничних перерізів вважається зосередженим у тонкій пристінній області, оскільки граничні умови спричиняють появу у ній розходження вектора швидкості та ротора вихору, і система (1) приймає вигляд

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{V} = R, \\ \operatorname{rot} \vec{V} = \vec{\Omega}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким чином, зроблено висновок, що вплив границь та фактичних умов на них на течію в основному об'ємі розрахункової області можна замінити впливом розподілених повздовж границь гідродинамічних особливостей. Інтегральне співвідношення для визначення цього впливу отримано в [1] за методом М.Є.Кочіна про відновлення поля швидкостей по відомим розходженню R та ротору вихору W вектора швидкості

$$\vec{V} = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{grad} \int_{S_\Sigma} \frac{\vec{n} \cdot \vec{V}}{r} ds + \frac{1}{4\pi} \operatorname{rot} \int_{S_\Sigma} \frac{\vec{n} \times \vec{V}}{r} ds. \quad (4)$$

При отриманні виразу (4) були враховані визначення $\operatorname{div} \vec{V}$ та $\operatorname{rot} \vec{V}$ як потоку вектора на нескінченно малих паралелограмах, на які розбита тонка пристінна область, а також

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = \operatorname{div} \vec{V}, \quad \vec{V} \times \vec{n} = \operatorname{rot} \vec{V}$$

Скалярний добуток векторів нормалі до елементарної площини в даній точці та вектору швидкості розглянуто як проекцію швидкості на напрям зовнішньої нормалі до площини $\vec{n} \cdot \vec{V} = V_n$, а векторний добуток представлено у вигляді вектору інтенсивності вихрового поля $\vec{n} \times \vec{V} = \vec{\gamma}$. При подальшому спрощенні рівняння (4) приймає вигляд

$$\vec{V} = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_\Sigma} V_n \frac{\vec{r}}{r^3} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{S_\Sigma} \frac{\vec{\gamma} \times \vec{r}}{r^3} ds. \quad (5)$$

Співвідношення (5) формально співпадає з аналогічним співвідношенням, що отримали Аржаних І.С., Джураєв Д.А. і Моргунов Г.М., але воно представляє вираз через параметри та фізичні образи, що традиційно використовуються в прикладній гідроаеромеханіці для моделювання течій. Аналіз отриманого рівняння показує, що збурення швидкості в потоці, викликане пристінним перехідним шаром, еквівалентне дії на потік шару гідродинамічних особливостей (вихорів та джерел).

Для безпосереднього вирішення крайової задачі граничні умови (2) виписані через проекції швидкості та напрямні косинуси вектору нормалі.

$$V_x \cdot \cos(n, x) + V_y \cdot \cos(n, y) + V_z \cdot \cos(n, z) = V_n^*, \quad (6)$$

$$V_x \cdot \cos(\tau, x) + V_y \cdot \cos(\tau, y) = V_u^*. \quad (7)$$

Отримане інтегральне представлення (5), подане в проекціях на осі координат, дозволяє знайти аналітичне рішення граничної задачі (1-2), якщо записати рівняння (6-7) для точок, що належать поверхні розрахункової області. В результаті отримано два інтегральних рівняння наступного вигляду:

$$\left(\frac{1}{4\pi} \int_S (\gamma_1 K_x^{\gamma_1} + \gamma_2 K_x^{\gamma_2}) ds \right) \cos(n, x) + \left(\frac{1}{4\pi} \int_S (\gamma_1 K_y^{\gamma_1} + \gamma_2 K_y^{\gamma_2}) ds \right) \cos(n, y) +$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{1}{4\pi} \int (\gamma_1 K_z^{\gamma_1} + \gamma_2 K_z^{\gamma_2}) ds \right) \cos(n, z) = V_n^* + \left(\frac{1}{4\pi} \int V_n K_x^q ds \right) \cos(n, x) + \\
& + \left(\frac{1}{4\pi} \int V_n K_y^q ds \right) \cos(n, y) + \left(\frac{1}{4\pi} \int V_n K_x^q ds \right) \cos(n, z)
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{4\pi} \int (\gamma_1 K_x^{\gamma_1} + \gamma_2 K_x^{\gamma_2}) ds \right) \cos(\tau, x) + \left(\frac{1}{4\pi} \int (\gamma_1 K_y^{\gamma_1} + \gamma_2 K_y^{\gamma_2}) ds \right) \cos(\tau, y) = \\
& = V_u^* + \left(\frac{1}{4\pi} \int V_n K_x^q ds \right) \cos(\tau, x) + \left(\frac{1}{4\pi} \int V_n K_y^q ds \right) \cos(\tau, y).
\end{aligned} \tag{9}$$

При цьому вважаємо, що доданки, до складу яких входить v_n , є відомі. Тому вони віднесені у праву частину рівнянь і це не знижує загального характеру отриманого результату.

У наведених виразах g_1 та g_2 - проекції вектору інтенсивності на базис локальної

системи координат елемента розрахункової сітки (рис. 1). Коефіцієнти K^q та K^γ - складові ядер інтегрального рівняння при розкладенні на декартову систему координат. При чисельній реалізації крайових задач поверхня розрахункової області поділяється на розрахункові елементи. Гранична умова (6) виставляється в межах кожного із розрахункових елементів на непроникних поверхнях твердих стінок, гранична умова (7) - на елементах вхідного і вихідного перерізів. Оскільки задовільно направлений вихровий шар $\vec{\gamma}$ представлено двома проекціями у локальному базисі кожного із елементів, то кількість рівнянь, побудованих на основі граничних умов (6-7) недостатня для визначення усіх невідомих. Для замикання моделі запропоновано використовувати умову соленоїдальності вихрового шару, з урахуванням якої отримано інтегральне представлення (5), на кожному із розрахункових елементів. При наявності елементів типу лопаті на її вихідних кромках використовується постулат Жуковського-Чаплигіна. Для розробки програмного засобу моделювання течії на основі (8-9) необхідно у дискретному вигляді представити границю розрахункової області і на її основі надати дискретний аналог цих рівнянь. При цьому враховані наступні міркування. Для обчислення значень інтегралів теоретично не має значення, у якому порядку виконується сумування доданків. Безперервний вихровий шар зводиться до його дискретних аналогів на елементах поверхні розрахункової області у локальній невиродженій системі координат. Значення інтегралів від відомих параметрів в правій частині рівнянь (8-9) обчислюється безпосередньо без переходу до гідродинамічних аналогів. Границя розрахункової області надається у вигляді макроелементів, тобто таких частин поверхні розрахункової області, які носять певний функціональний характер, - поверхні лопатей робочого колеса та лопаток напрямного апарату; поверхонь міжлопатевих каналів; поверхонь, що обмежують проточну частину між лопатевими системами; поверхонь обтікачів, привідних двигунів, спіральних кільцевих відводів, напівспіральних, колінних підводів тощо. Кожен із вказаних макроелементів в умовно виділених поздовжньому та поперечному напрямках розбивається вузлами на чотирикутні елементи.

Усі макроелементи, які використовуються для побудови границь розрахункової області, умовно розділені на дві групи. До першої групи віднесені такі макроелементи, поверхня

яких розбивається на розрахункові елементи за допомогою алгебраїчних співвідношень аналітичної геометрії. До другої групи віднесено макроелементи, на яких координати вузлів обчислюються не тільки за аналогічними співвідношеннями, але й за допомогою процедур інтерполяції, процедур визначення ліній перетину базової поверхні додатковим поверхнями, які забезпечують розв'язання систем рівнянь.

Незалежно від поділу макроелементів на групи, інформація по розрахунковим елементам, побудованим на них, подається в однаковому виді і включає в собі координати чотирьох вузлів, що визначають сторони елемента, розрахункову точку в центрі елемента, в якій виставляється умова типу (8) чи (9), напрямні косинуси нормалі до площини елемента, тощо (рис. 2).

Алгоритм побудови розрахункових сіток на макроелементах розроблений таким чином, щоб забезпечити невиродженість базису локальних систем координат. Такі системи найкраще будуються на чотирикутних елементах.

Застосування набору макроелементів дозволяє побудувати різноманітні проточні частини, тим самим забезпечується загальний характер геометричної моделі. Також витриманою є умова однорідності геометричної моделі, тому що при формуванні дискретної моделі використовується набір однотипних просторових елементів, обробка яких не залежить від типу макроелементів (типу і структури ПЧ гідромашин).

Дискретизація безперервного вихрового шару виконана наступним чином. Застосування для обчислення інтегралів у рівняннях (8-9) найпростіших формул типу прямокутників базується на припущенні про рівномірність розподілу завихореності у пристінному шарі вздовж одного елемента. Вихровий шар на елементі поверхні $\vec{\gamma}(S)$ "згортається" у два вихрових відрізки Γ_1 та Γ_2 , що розташовуються вздовж таких двох сторін елемента, які утворюють невироджений базис локальної системи координат (рис. 3). Для цього використовується теорема Стокса. Це дає можливість, по-перше, використовувати досвід, напрацьований в методі дискретних вихорів (МДВ), по-друге, вважати усі поверхні розрахункової схеми гладкими і не передбачати окремих алгоритмів для опрацювання окремих випадків моделювання місць поєднання лопаток з поверхнями корпусу та втулки, інших місць різкого змiну напрямку нормалі до поверхні проточної частини. Вказані умови дозволяють скористатися формулами типу Біо-Савара для швидкостей, що збурюють у потоці дискретні вихрові відрізки.

Оскільки в межах розрахункового елемента $\gamma = const$ в силу прийнятих умов, то згідно (8-9) отримано

$$\int_{\Delta S_i} \gamma_1 K_x^\gamma ds \cos(n_i, x) = \gamma_{1i} K_x^\gamma l_{1i} l_{2i} \cos(n_i, x) = \Gamma_{1i} K_x^\gamma l_{2i} ,$$

$$\int_{\Delta S_i} \gamma_2 K_x^\gamma ds \cos(n_i, x) = \gamma_{2i} K_x^\gamma l_{1i} l_{2i} \cos(n_i, x) = \Gamma_{2i} K_x^\gamma l_{1i} .$$
(10)

На кожному з елементів твердих поверхонь необхідно дотримання умови непротікання

поверхні. Комплекс $K^\gamma l$ представляє собою швидкість, збурену дискретним вихором

одиначної інтенсивності, тому традиційно позначимо його через $W_\Gamma = K^\gamma l$. За прийнятих умов дискретний аналог рівняння (8) на кожній із NT елементів твердої поверхні має вид

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^N \Gamma_{1j} \left[W_x^{\Gamma_{1j}} \cos(n_i, x) + W_y^{\Gamma_{1j}} \cos(n_i, y) + W_z^{\Gamma_{1j}} \cos(n_i, z) \right] + \\
& + \sum_{j=1}^N \Gamma_{2j} \left[W_x^{\Gamma_{2j}} \cos(n_i, x) + W_y^{\Gamma_{2j}} \cos(n_i, y) + W_z^{\Gamma_{2j}} \cos(n_i, z) \right] = 4\pi \cdot V_{ni}^* + \\
& + \sum_{p=1}^{N_1+N_2} \left(\int_{\Delta S_p} V_{np} K_x^{qp} dS_p \right) \cos(n_i, x) + \sum_{p=1}^{N_1+N_2} \left(\int_{\Delta S_p} V_{np} K_y^{qp} dS_p \right) \cos(n_i, y) + \\
& + \sum_{p=1}^{N_1+N_2} \left(\int_{\Delta S_p} V_{np} K_z^{qp} dS_p \right) \cos(n_i, z), \quad i = \overline{1, N_T}, \quad j = \overline{1, N}
\end{aligned} \tag{11}$$

На поверхнях S_1 та S_2 виконується умова заданої закрутки потоку

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^N \Gamma_{1j} \left[W_x^{\Gamma_{1j}} \cos(\tau_m, x) + W_y^{\Gamma_{1j}} \cos(\tau_m, y) \right] + \sum_{j=1}^N \Gamma_{2j} \left[W_x^{\Gamma_{2j}} \cos(\tau_m, x) + W_y^{\Gamma_{2j}} \cos(\tau_m, y) \right] = \\
& = 4\pi \cdot V_{um}^* + \sum_{p=1}^{N_1+N_2} (V_{np} K_x^{qp} \Delta S_p) \cos(\tau_m, x) + \sum_{p=1}^{N_1+N_2} (V_{np} K_y^{qp} \Delta S_p) \cos(\tau_m, y) \\
& \quad j = \overline{1, N}, \quad m = \overline{1, N_1 + N_2}
\end{aligned} \tag{12}$$

На кожному елементі розташовано два дискретних вихрових відрізка, інтенсивність яких невідома. Тому на N елементах ми маємо $2N$ невідомих, а граничних умов (11-12) для реальних розрахункових схем - половина від необхідних. Відповідно, необхідна додаткова умова, яка б пов'язувала між собою інтенсивності дискретних вихорів на елементах. Такою умовою вибрано збереження соленоїдальності вихрового поля, яка використовувалася при отриманні інтегрального співвідношення (5). Для дотримання однорідності алгоритму рішення необхідно рівняння умови соленоїдальності вихрового поля $\text{div } \vec{\gamma} = 0$ представити через дискретні вихори Γ_1 та Γ_2 .

Згідно формули Остроградського для розходження вектору вихору та теореми Стокса показано, що сума інтенсивностей усіх дискретних вихорів, що з'єднуються в одному вузлі, дорівнює нулю. На кожному із N елементів у вузлі розгалуження вихорів Γ_{1j} та Γ_{2j} потрібно виконати цей баланс інтенсивності вихорів, який у матричному записі має вигляд

$$\sum_{i=1}^n a_{ki} \Gamma_i = 0 \tag{13}$$

де Γ_i – інтенсивність вихрового відрізка з номером i .

Коефіцієнти a_{ki} утворюють матрицю інцидентності і приймають наступні значення:

$a_{ki} = 1$ - якщо i -тий вихровий відрізок з'єднується з вузлом k і вихор направлений до вузла,

$a_{ki} = -1$ - якщо i -тий вихровий відрізок з'єднується з вузлом k і вихор направлений від

вузла,

$a_{ki} = 0$ - якщо i -тий вихровий відрізок не з'єднаний з вузлом k .

Таким чином, маємо $2N$ рівнянь для $2N$ невідомих. Система лінійних алгебраїчних рівнянь визначена і має одне рішення.

Проведений аналіз способів виконання постулату Чаплигіна-Жуковського у дворозмірних та просторових задачах моделювання течій дозволив вибрати варіант, що забезпечує однорідність алгоритму обчислень і виконується як геометрична умова сходу потоку у напрямку кромки в межах ближнього сліду.

Рівняння (11-12) та (13) складають повну систему рівнянь дискретної моделі для визначення інтенсивності дискретних вихрових відрізків.

Швидкості в точках контрольних перерізів та на вибраних поверхнях визначаються за дискретним аналогом інтегрального представлення (5). Тиск визначається за формулою Бернуллі.

Для визначення інтегральних та усереднених показників запропоновано уніфікований та узагальнений опис контрольної поверхні та параметрів гідродинамічного поля на ній.

Самі показники визначаються шляхом чисельного інтегрування складових швидкості та напружень.

У четвертому розділі, викладено результати тестування розробленого програмного засобу, приведено окремі результати розрахунку та порівняння розрахункових даних з експериментальними.

Тестування алгоритму та програмного засобу виконано на прикладі точного аналітичного рішення вісесиметричної течії рідини в криволінійному каналі. Форма каналу описується

$$r = r_0 \sqrt{1 + r_0 \frac{a_1 z_1}{a_0 z_0}}$$

рівнянням , де $r_0 = 1 \text{ м}$ - значення радіусу на початку каналу. Канал спроектовано таким чином, що витратна складова швидкості вздовж осі каналу

змінюється по лінійному закону $V_z(0, z) = a_0 + a_1 z$ від $V_{z1} = 1$ м/с на початку каналу до

$V_{z2} = 2$ м/с на виході із нього. При цих даних витрата рідини через канал складає

$Q = \pi \text{ м}^3/\text{с}$. На рис.4 наведено порівняння величини витратної складової швидкості отриманої із розрахунку та аналітичного рішення. Максимальне відхилення величини швидкості, отриманої за допомогою запропонованого засобу, від аналітичного рішення складає 4,7%, а середнє близько 1,0%.

Виконано співставлення визначеного експериментально та за допомогою програмного засобу усередненого моменту швидкості у вихідному перерізі напрямного апарату осьового насоса ОПМ 2500-5. Усереднений момент експериментально визначався за допомогою вимірювальної ґратки та 5-канального зонду. Результати вимірювання наведено на рис.5. Розходження між розрахунковими та експериментальними даними знаходяться в межах 7%, що є прийнятним для практичних цілей.

Для визначення структури течії за напрямним апаратом та співставлення її з

розрахунковою було проведено зондування потоку для двох режимів $Q = 0.061$ та

$Q = 0.075$ (м³/с), що лежать в зоні оптимальної по ККД витрати. В результаті були отримані епюри колової та витратної складових швидкості (рис.6). Похибка вимірювання за допомогою зонду складала 6%.

Результати зондування свідчать про те, що витратна складова швидкості, як і момент швидкості є практично постійними по перетину (рис.6). Розрахункові та експериментально визначені епюри задовільно співпадають. Цей факт добре узгоджується із моделлю потенціальної течії в напрямному апараті і підтверджує

правомірність використаної моделі та знехтування в'язкістю.

Результати тестування і експериментальної перевірки розробленого засобу ведення розрахункового експерименту дозволяють зробити висновок про можливість реальної заміни значної частини фізичного експерименту розрахунковим при визначенні гідродинамічних параметрів потоку в ПЧ лопатевих насосів.

У додатках наведені блок-схеми алгоритмів розробки геометричної моделі, формування матриці коефіцієнтів системи лінійних алгебраїчних рівнянь, розрахунку параметрів гідродинамічного поля, усереднених та інтегральних характеристик робочого процесу в проточній частині лопатевих насосів; акти впровадження результатів роботи.

Висновки

Створено засіб ведення розрахункового дослідження просторового потенціального потоку нестисливої рідини в елементах проточних частин лопатевих насосів, який дозволяє визначати характеристики течії рідини, безвідносно до конкретного конструктивного виконання елементів та проточної частини насоса в цілому, та забезпечує достатню точність отриманих результатів для часткової заміни високовартісного фізичного експерименту більш дешевим розрахунковим.

За результатами проведеного дослідження зроблені наступні висновки:

1. Констатується, що підвищення показників якості насосного обладнання та, стосовно нього, проектувальних робіт може бути досягнуто шляхом раціонального поєднання фізичного і розрахункового експерименту та подальшого розвитку останнього на основі математичного моделювання течії в елементах проточної частини лопатевих насосів.
2. Запропонована постановка задачі дослідження течії на основі вирішення внутрішньої крайової задачі типу Гільберта для моделі просторової потенціальної течії нестисливої рідини на базі двох граничних умов – традиційної умови відносно нормальної складової швидкості, яка визначає витрату Q , та додаткової умови для коллової складової швидкості, яка визначає напір насоса H .
3. Реалізовано рішення поставленої задачі таким чином, що отримана математична модель, методика та алгоритм її вирішення, програмні засоби на їх основі, вихідна інформація про гідродинамічні та геометричні дані для побудови дискретної моделі не залежать від типу та складу ПЧ насоса, тобто витримана умова наскрізної однорідності усіх етапів рішення. Для цього рішення знаходиться на основі граничних інтегральних рівнянь.
4. Встановлено, з урахуванням фізичних умов, зв'язок між швидкістю у будь-якій точці розрахункової схеми зі значеннями швидкостей на границях, які обмежують потік, у вигляді інтегрального представлення.
5. Отримано аналітичне рішення запропонованої складеної крайової задачі типу Гільберта.
6. Виконано дискретизацію геометричної та гідродинамічної моделей. Показано, що застосування формул чисельного інтегрування типу прямокутників приводить до моделювання твердих границь проточної частини лише вихровими відрізками постійної інтенсивності, розташованими вздовж невивіржених сторін чотирикутних елементів. Для дотримання умови гідродинамічної замкненості моделі використано дискретну умову збереження соленоїдальності вихрового шару. Дискретна модель аналітичного рішення крайової задачі внутрішньої гідродинаміки за прийнятих умов зведена до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яка вирішується методом Гауса.
7. Отримане рішення пристосоване для визначення швидкостей та тиску у контрольних перерізах та на визначених поверхнях, за якими, в свою чергу, визначаються інтегральні та осереднені параметри потоку, що традиційно використовуються для визначення показників якості робочого процесу лопатевих насосів.
8. Розроблений засіб ведення розрахункових досліджень у насособудуванні перевірено

шляхом співставлення отриманих за його допомогою результатів з результатами відомого аналітичного рішення та експериментальних даних.

9. Результати виконаного дослідження впроваджені на підприємствах України (ВАТ “ВНДІАЕН”, ВАТ “Сумське МНВО ім.Фрунзе”) та в навчальному процесі (СумДУ).

Список опублікованих праць здобувача

1. Неня В.Г., Баранова І.В. Складена крайова задача типу Гільберта // Вісник СумДУ, 1998. - №2(10). - С. 57-62.
2. Баранова І.В. Визначення показників якості проточної частини гідромашин за результатами рішення просторових задач // Вестник НТУУ "КПІ": Машиностроение. – Киев, 1999. - Вып.35. - С.210-214.
3. Неня В.Г., Баранова І.В., Гусак А.Г. Влияние способа установки погружных насосов при эксплуатации на их внешние характеристики // Вестник НТУУ "КПІ": Машиностроение. – Киев, 1999. - Вып.36. - Т.2. - С.513-522.
4. Неня В.Г., Баранова І.В., Євтушенко А.О. Вибір початкових даних для розрахунку обтікання елементів проточної частини гідромашин просторовим потоком // Вестник НТУУ "КПІ": Машиностроение. – Киев, 2000. - Вып.38. – Т.2. - С.3-7.
5. Баранова І.В., Неня В.Г. Соленоїдальність вихрових полів в дискретних моделях потоків // Технології в машинобудуванні: Вісник Національного техн. ун-ту "Харківськ. політехн. ін-т": Збірка наук. праць. Вип.129. Ч.1. – Харків, НТУ "ХПІ", 2001. – С.386-390.
6. Неня В.Г., Баранова І.В., Євтушенко А.А. Математическое моделирование течения в подводящем направляющем аппарате осевого погружного насоса // Физико-технические и технологические приложения математического моделирования: Сб. научных трудов /НАН Украины, Ин-т математики. – Киев, 1998. – С.97-100.
7. Баранова І.В., Неня В.Г., Кочевский А.Н. Разработка однородных математических моделей пространственного течения в гидромашине // Труды 8-й Международной научн.- техн. конф. “Насосы 96” - Сумы: ИПП “Мрия” ЛТД, 1996. Т.1- С.254 - 259.
8. Неня В.Г., Баранова І.В. Объектно-ориентированный анализ и реализация моделей для решения внутренних краевых задач течения идеальной жидкости // Труды VII Междун. симпоз. “Методы дискретных особенностей в задачах математической физики” – Феодосия, 1997. - с. 109-112.
9. Баранова І.В. Математичне моделювання течій в елементах гідромашин // Праці II наук.-техн. конф. "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці". – Черкаси: ЧІПІ, 1998. – С.158-161.

Анотація

Баранова Ірина Володимирівна. Створення засобу ведення розрахункового експерименту в насособудуванні на базі просторової моделі потенціальної течії. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. - Сумський державний університет, Суми, 2002.

Дисертація присвячена питанню чисельного моделювання просторових течій у проточній частині насосів. Постановлена і вирішена внутрішня крайова задача для просторових потенціальних течій в елементах проточної частини, яка враховує дві граничні умови, необхідні при блочно-модульному проектуванні. Розроблений спосіб представлення геометричних моделей елементів проточної частини лопатевих гідромашин, що не залежить від її складу та конструкції. Створений засіб ведення розрахункового експерименту для визначення структури потоку і обчислення інтегральних та усереднених параметрів робочого процесу в лопатевих системах. Основні результати роботи знайшли застосування при розробці робочих проектів дослідних зразків насосів.

Ключові слова: лопатевий насос, проточна частина, геометрична модель, просторовий потік, потенціальна течія, гідродинамічні особливості, чисельний експеримент.

Summary

Baranova Irina W. Creation of a tool for conducting computational experiments in the pump building industry on the basis of spatial model of potential flow. - 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, 2002.

The thesis is dedicated to problems of numerical modeling the three-dimensional flows in the hydraulic part of pumps. The internal boundary value problem for spatial potential flows in the elements of the hydraulic part was put and resolved. This problem uses two boundary conditions indispensable for block-module designing. The way to represent geometrical models of the elements of the hydraulic part of bladed machines was elaborated. This way does not depend on their structure and design. The tool for conducting computational experiments in order to determine flow pattern and calculate both integral and averaged parameters of the working process in bladed systems was created. The basic results of research were used in the development of a project of sample pumps.

Key words: bladed pump, hydraulic part, geometrical model, spatial flow, potential flow, hydrodynamic singularities, numerical experiment.

Аннотация

Баранова Ирина Владимировна. Создание средства ведения численного эксперимента в насосостроении на базе пространственной модели потенциального течения. - Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 - гидравлические машины и гидропнеumoагрегаты. - Сумский государственный университет, Сумы, 2002.

Принятая на Украине концепция развития насосостроения предусматривает полное удовлетворение потребностей всех отраслей в этом виде оборудования. Для этого предложено практически реализовать блочно-модульный принцип проектирования и изготовления насосов. Для создания необходимого набора составных модулей необходимо проведение значительных объемов научно-исследовательских работ. Их выполнение при минимальных затратах средств и времени связывается с широким применением численного эксперимента.

Диссертация посвящена вопросу компьютерного моделирования пространственных безвихревых течений в проточной части гидромашин. В работе развивается подход, основанный на методе граничных интегральных уравнений. Предложена постановка составной краевой задачи, в основу которой положены два граничных условия: первое - традиционное для нормальной составляющей скорости, которое определяет подачу насоса, второе - для окружной составляющей скорости, определяющее напор насоса. Решение краевой задачи сведено к двум граничным интегральным уравнениям, полученным на основе интегрального представления для скорости в произвольной точке расчетной области через ее значение на границе.

Численная реализация осуществлена на основе метода граничных элементов.

Использование элементов с кусочно-постоянными функциями позволило рассматривать все поверхности проточной части как гладкие и свести решение интегральных уравнений к методу дискретных вихрей. При этом на каждом элементе вихревой слой моделируется двумя дискретными вихревыми отрезками и для определения возмущенных ими скоростей используется закон Био-Савара.

Для замыкания системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится дискретный аналог обоих интегральных уравнений, используется условие

соленоидальности вихревого слоя, которое было использовано при получении интегрального представления для скорости. Для численной реализации этого условия получен его дискретный интегральный аналог. Удобство использования предложенного условия достигается введением сокращенной записи разреженной матрицы инцидентности вихревых отрезков, рассматриваемых в данном случае как ребер направленного графа.

Для придания универсальности разрабатываемому средству ведения численного эксперимента обосновывается обязательность соблюдения условия однородности всех составляющих математической модели от постановки задачи до разработки и использования программного продукта. При этом особое внимание уделено разработке однородной геометрической расчетной схемы на основе использования разнообразных элементов, возможных при использовании блочно-модульного проектирования.

Построение расчетной геометрической модели двухэтапное. На первом этапе геометрическая модель формируется из набора макроэлементов, которые относятся к двум типам. К первому относятся участки канонических поверхностей, а ко второму - элементы, используемые при формировании специфических для насосостроения поверхностей рабочих органов проточной части. На втором этапе поверхность каждого из макроэлементов разбивается на расчетные элементы и формируется информация, необходимая для решения граничных интегральных уравнений, к которым сведена краевая задача моделирования течения в проточной части.

После определения интенсивностей дискретных вихрей рассчитываются значения поля скоростей и давлений в контрольных сечениях или на указанных поверхностях. По ним определяются значения осредненных по расходу параметров рабочего процесса, для чего предложена унифицированная процедура. Данная процедура может использоваться как при расчетном, так и при физическом эксперименте, в котором определяется структура течения в контрольных сечениях проточной части гидромашин.

Созданное средство ведения расчетных исследований в насосостроении апробировано и внедрено на предприятиях Украины и в учебном процессе. С его использованием разработан рабочий проект модернизированного насосного агрегата ОПМ 2500-5.

Ключевые слова: лопастной насос, проточная часть, геометрическая модель, пространственный поток, потенциальное течение, гидродинамические особенности, численный эксперимент.

Підп. до друку 17.05.2002 р.
Наклад 100 прим.
Замовл. №

Формат 60x90/16.
Обл.-вид. арк. 1,1.

— “Ризоцентр” СумДУ. 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.