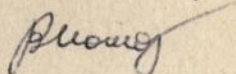


АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ

На правах рукопису

УДК 519.673:621.671

МОМОТ Володимир Євгелійович



ПРОСТОРОВА В'ЯЗКА ТЕЧІЯ У ОСЬОВИХ ШНЕКОВИХ
ПЕРЕДНАСОСАХ

Спеціальність 01.02.05 - Механіка рідин, газу та плазми

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ 1994

ДВ 29.375

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Інституті технічної механіки Академії Наук України.

Науковий керівник - академик АН України,
доктор технічних наук,
професор
Пилипенко Віктор Васильович.

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук,
професор
Буйвол Василь Миколайович

кандидат фізико-математичних наук
Беляев Микола Миколайович

Провідна організація - Конструкторське бюро "Південне"

Захист відбудеться "17" березня 1994р. о "14" годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.04.01 при Інституті гідромеханіки АН України (252057, Київ, вул. Желябова 8/4).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту гідромеханіки АН України.

Автореферат розісланий "28" січня 1994р.

Вченій секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук

С.І.Кріль

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

AB - 22.575

1.1. Актуальність теми досліджень. Обчислювальна гідродинаміка (ОГД) починає грати значну роль у створенні теоретичних основ проектування, включаючих вирішення задач внутрішньої аеродинаміки літальних апаратів, турбомашинобудування, насособудування та інших областей, де виникають проблеми, обумовлені складним рухом рідини та газу.

Ураховуючи сучасний рівень експериментальних досліджень, запроваджуємих у насособудуванні, а також накопленій обсяг емпіричних та напівемпіричних розрахункових методів застосовувемих на практиці, можна зробити висновок, що методи ОГД набувають перевагу при створенні теоретичних основ проектних та перевірочних розрахунків у цій області техніки, як найбільш ефективні для вивчення проблем, включаючих взаємодію декількох відомих явищ.

Для сучасного насособудування характерно використання високообертових багаторядних лопатевих насосів, знаходячих широке застосування у паливних, живильних системах, системах охолодження, функціонуючих у авіаційній, ракетно-космічній техніці, тепловій та ядерній енергетиці. Разом з тим підвищення частоти обертання таких насосів, забезпечуюче оптимальні енерговагові характеристики, спричинює існування складного трьохвимірного поля течії у міжлопатевих каналах насосів, а також посилення впливу кавітаційних явищ, реалізуються у потоку, на енергетичні характеристики гідромашин.

Для ослаблення останнього небажаного ефекту осьові шнекові переднасоси (ОШП), аналізу кавітаційної течії у яких присвячена дана робота, використовуються як перший ряд лопатевої системи.

Великий внесок у створення теоретичних основ розрахункових методів для моделювання безкавітаційної течії в ОШП внесли японські дослідники Мураками, Тоюкура, американські - Лакшмінараяна, Гортон, Ха, У колишньому СРСР над вказаною проблемою

працювали Б.В.Овсянніков, Б.И.Воровский та ін. В Україні фундаментальні дослідження кавітаційної течії в ОШП проведені В.В.Пилипенком, теоретичні дослідження кавітаційних течій велись Г.В.Логвиновичем, В.Н.Буйволом.

Проміж багатьох різних факторів, пов'язаних із створенням нових удосконалених методик прогностичних розрахунків течії у обертових лопатевих системах самим важливим з'являється обгрунтоване урахування ефектів в'язкості, трьохвимірності та кавітації. Розрахункова методика, найбільш повно ураховуюча вказані ефекти та не вимагаюча притягнення емпіричних даних, дозволить значно підвищити достовірність прогнозування енерго-кавітаційних характеристик осьових та відцентрових насосів; утворювати ОШП орієнтовані на в'язку поведінку середі (тобто забезпечуючі мінімальні втрати при заданому режимі); формувати структуру потоку на виході з міжлопатєвого каналу, володіючи заданими властивостями. Крім того, можливість врахування просторових кавітаційних явищ може служити основою для оцінки динамічних властивостей ОШП з різними конструктивними особливостями.

Розробка теоретичних основ розрахункових методик, забезпечуючих вищеперелічені можливості, якій присвячена дисертація, стає вельми актуальною.

1.2. Метою даної роботи є: розробка теоретичного методу прогнозування енергетичних характеристик ОШП; розробка теоретичного методу оцінки параметрів кавітаційної течії, дозволяючого підвищити достовірність перевірочних розрахунків при проектуванні ОШП нетрадиційних конструкцій та сприяючого утворенню ОШП з наперед заданими характеристиками течії; вивчення властивостей в'язкої просторової течії у каналах ОШП.

Ця мета передбачає рішення таких конкретних задач:

-аналіз переваг та недоліків існуючих теоретичних та чисельних методів моделювання безкавітаційної течії у ОШП;

-аналіз переваг та недоліків існуючих підходів до визначення параметрів кавітаційної течії у ОШП;

-побудування різницевої схеми для чисельного вирішення повних осереднених з Рейнольдсу трьохвимірних рівнянь Нав'є-Стоксу, записаних у змінних "вихор-векторна функція току" у криволінійних ортогональних координатах;

-вибір підходу до моделювання турбулентних ефектів у ОШП та розробка методики оцінки узагальнюючого коефіцієнту в'язкості просторової течії у ОШП, заснованої на притягненні експериментальних даних;

-розробка методики обчислювального експерименту (ОЕ) для моделювання течії у ОШП, працюючого у широкому діапазоні режимних параметрів;

-моделювання поля трьохвимірної течії і вивчення структури та параметрів вторинних течій у каналах ОШП та уточнення на цій основі гіпотез про причини виникнення поворотних течій (ПТ) на вході у ОШП;

-розробка та реалізація математичної моделі, дозволяючої оцінити у першому наближенні параметри просторової кавітаційної течії у ОШП, працюючому у широкому діапазоні режимних параметрів.

1.3. Предметом дослідження є в'язка трьохвимірна течія рідини у ОШП ускладнена ефектами кавітації.

1.4. Наукова новизна роботи полягає у такому:

-повні трьохвимірні рівняння Нав'є-Стоксу у змінних "вихор-векторна функція току" уперше застосовані для моделювання просторової течії у обертових лопатевих системах;

-розроблено нову методику обчислювального експерименту, що опираються на повні осереднені з Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стоксу

для моделювання просторової течії у осьових шнекових переднасосах різних конструкцій, працюючих на безкавітаційному режимі у широкому діапазоні змінювання витрати рідини через насос;

-на основі узагальнення експериментальних даних для декількох переднасосів значно відмінних за конструктивними параметрами сформовано узагальнюючий комплекс, маючий смисл числа Рейнольдсу для ОПП, величина якого виявилась постійною для зазначеного ряду осьових насосів;

-під час чисельного моделювання виявлено існування складної просторової картини вторинних течій усередині міжлопатевих каналів ОПП на режимах роботи по витраті, для яких напівемпіричні теорії, засновані на експериментальних розподілах гідродинамічних параметрів у вхідній частині ОПП, передбачають відсутність вторинних течій;

-за допомогою серії обчислювальних експериментів простежена закономірність утворення та розвитку поворотних течій на вході у переднасос, продемонстрована визначаюча роль коріолісової сили інерції у порушенні радіальної рівноваги рідини та виникнення радіальної течії до периферії каналу, таким чином теоретично підтверджена одна із існуючих гіпотез щодо причин виникнення поворотних течій на вході у насос, трактує останні як результат сумісного впливу сил в'язкості та інерції;

-розроблена методика обчислювального експерименту, дозволяюча визначити вплив профільних кавітаційних утворень на енергетичні характеристики ОПП.

1.5. Практична цінність роботи складається у тому, що розроблені методики можуть бути використані для:

• оцінки впливу різних конструктивних параметрів (у тому числі для насосів нетрадиційних конструкцій): велике втулке відношен-

ня, великий радіальний зазор, двохрядні шнеки і т. п.) на енергетичні характеристики ОШП;

- створення баз даних, утримуючих достатньо повну інформацію про структуру течії у різних ОШП;

- оцінки параметрів кавітаційної течії у ОШП нетрадиційних конструкцій у першому наближенні.

Крім того, отриману в роботі узагальнену залежність в'язкості течії від режимних та геометричних параметрів ОШП можна використовувати для утворення нових методик чисельного моделювання трьохвимірної течії у ОШП, у яких в'язкість приймається постійною по всьому розрахунковому об'єму. Уточнена гіпотеза про причини поворотних течій на вході у ОШП може служити основою для утворення спрощених інженерних методик.

1.6. Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та були схвалені на: семінарі НДІТТ під керівництвом проф. Б.Ф.Глікмана м. Москва, 1989 р., II Всесоюзній школі молодих вчених "Чисельне моделювання процесів гідрогазодинаміки та енергетики" м. Новосибірськ, 1990 р., I Всесоюзній науково-практичній конференції "Проблеми динаміки паливних та пневмогидравлічних систем літальних апаратів та двигунів" м. Куйбишев, 1990 р., VI Всесоюзній нараді по кавітаційним автоколиванням та динаміці гідросистем м. Дніпропетровськ, 1990 р., II Всесоюзній науково-практичній конференції "Практичне застосування сучасних технологій програмування, пакетів прикладних програм у обчислювальних системах та сітках ЕОМ" м. Дніпропетровськ, 1990 р., I Всесоюзному семінарі по динаміці просторових та нерівноважних течій рідини та газу м. Челябінськ-Міасс, 1991 р., II російсько-китайському симпозіумі по космічній науці та техніці м. Самара, 1992 р.

1.7. Обсяг та структура роботи. Загальний обсяг дисертації - 159 сторінок, включаючи 58 малюнка, 2 таблиці, 109 найменувань,

літературних джерел. Основний зміст роботи висловлено на 144 сторінках машинописного тексту, складеного із вступу, трьох глав, заключення.

У вступі обгрунтована актуальність теми досліджень, визначені мета, задачі та предмет роботи, показані наукова та практична цінність здобутих результатів.

У першій главі "Чисельне моделювання просторової в'язкої течії у ОШП на основі повних рівнянь Нав'є-Стоксу" розглянуті та проаналізовані існуючі теоретичні та чисельні підходи до моделювання течій у обертових лопатевих системах; обгрунтовано вибір повних трьохвимірних рівнянь Нав'є-Стоксу у змінних "вихор-векторна функція току" як основи для створення методики обчислювального експерименту, моделюючого течію у ОШП, працюючому у широкому діапазоні режимних параметрів; власно розроблена зазначена методика обчислювального експерименту; проведено порівняння результатів розрахунку з існуючими експериментальними даними.

У другій главі "Особливості трьохвимірної в'язкої течії у ОШП, працюючому у широкому діапазоні режимних параметрів" розроблена проста обчислювально-експериментальна методика визначення в'язкості просторової течії у ОШП; досліджені закономірності поведінки трьохвимірної в'язкої течії у ОШП при зміні витрати; наведена проста методика локалізації джерела поворотних течій по результатам ОЕ; визначені характеристики турбулентності течії у першому наближенні; досліджено вплив конструктивних особливостей ОШП (великий радіальний зазор, бандаж, радіальні розрізи, велике втулкове відношення) на характеристики течії у шнеку.

У третій главі "Оцінка параметрів просторових кавітаційних явищ у ОШП у першому наближенні" розглянуті та проаналізовані існуючі аналітичні та чисельні підходи до моделювання кавітаційної течії у ОШП; сформульована задача чисельного моделювання просто-

рової в'язкої кавітаційної течії в ОШП у повній постановці та вказані спрощувачі припущення, дозволяючі вирішити цю задачу у першому наближенні; розроблена методика оцінки параметрів просторової в'язкої кавітаційної течії в ОШП на основі повних рівнянь Нав'є-Стоксу у першому наближенні; наведені результати порівняння параметрів кавітаційних явищ, одержаних за допомогою обчислювального експерименту з експериментальними даними та розрахунком по існуючим аналітичним методикам.

У заключенні узагальнені висновки по результатам здійснених досліджень.

2. Захищасмі результати досліджень та їх обґрунтування.

У дисертації захищаються нижчеприведені нові для науки розробки.

2.1. Вибір математичної моделі для розрахунку просторової течії у осьовому шнековому переднасосі. У основі вибору математичної моделі для розрахунку просторової течії у ОШП було покладено зазначення Лакшмінараяни про те, що поглиблене розуміння ефектів в'язкості, турбулентності та трьохвимірності дозволить створити поліпшені конструкції переднасосів, а також буде сприяти більш систематизованому вивченню течії у ОШП цілком. Аналіз існуючих методик розрахунку параметрів течії у ОШП показав, що моделлю, оптимально відповідаючою наведеним вимогам, з'являються повні трьохвимірні осереднені з Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стоксу.

2.2. Методика розрахунку трьохвимірного в'язкого потоку у осьових шнекових переднасосах. У дисертації розроблено нову методику чисельного моделювання просторової в'язкої течії в проточній частині ОШП, базуючися на повні трьохвимірні осереднені з Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стоксу у змінних "вихор-векторна функція

току", де турбулентність моделювалася постійним по всьому розрахунковому об'єму коефіцієнтом турбулентної в'язкості.

Вибір змінних "вихор-векторна функція току", у першу чергу, продиктований прагненням автора здобути ефективний чисельний алгоритм без застосування особливих засобів, необхідних для розрахунку коректного поля тиску по рівнянням Нав'є-Стоксу у фізичних змінних. Окрім того, вибрані змінні дають інваріантну форму запису рівнянь руху у будь-якій неінерціальній системі координат.

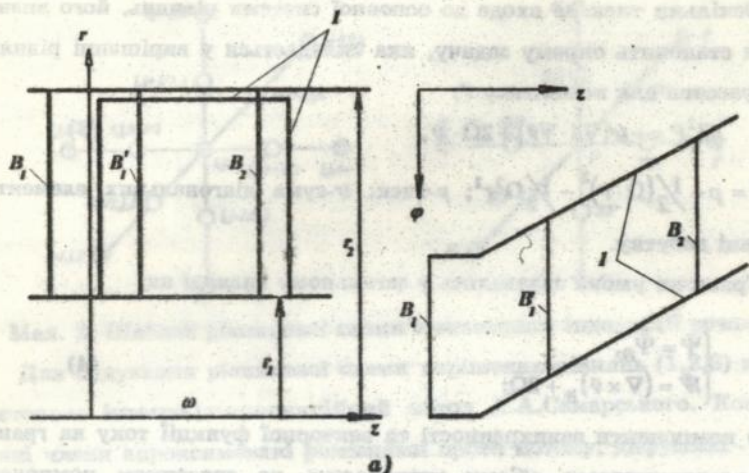
Стаціонарні рівняння Нав'є-Стоксу у векторній формі мають вид:

$$\bar{v} \cdot \nabla \bar{W} = \bar{W} \cdot \nabla \bar{v} + \nu_1 \nabla^2 \bar{W}, \quad (1)$$

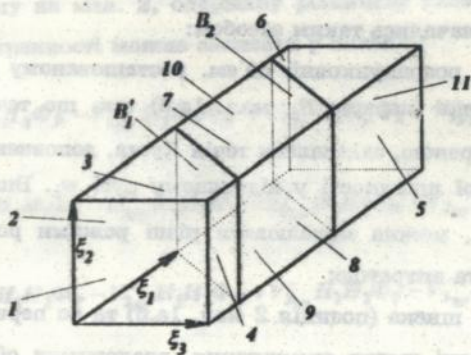
де \bar{v} -вектор відносної швидкості; $\bar{W} = \bar{w} + 2\bar{\Omega}$ -вектор приведеної завихреності, урахувавши обертання системи координат; \bar{w} -вихор; ν_1 -турбулентна в'язкість; $\bar{\Omega}$ -кутова швидкість обертання системи координат.

Система координат, обертається укупі зі шнеком, обрана, щоб уникнути необхідності вирішення нестационарної задачі.

Певним спрощенням обчислювальної процедури став вибір системи криволінійних ортогональних координат ξ_1, ξ_2, ξ_3 , де вісь ξ_1 спрямована по гвинтовій лінії у основі шнека; вісь ξ_2 - по радіусу; вісь ξ_3 - перпендикуляр осям ξ_1 та ξ_2 у кожній точці. Такий вибір системи координат відображає реальну область інтегрування рівнянь, показану на мал. 1а у вигляді двох проєкцій - меридіональної та розгортки циліндричного перерізу - на прямокутний паралелепіпед з рухаючоюся верхньою кришкою (мал. 1б). При запису рівнянь руху у координатній формі використовувалися коефіцієнти Ляме, відповідні зазначеному відображенню та одержані у дисертації для шнека постійного шагу.



а)



б)

Мал. 1. Схема розрахункового об'єму: а) розгортка у циліндричних координатах; 1-лопаті шнека; б) розрахунковий об'єм у ортогональних координатах з вказанням характерних перерізів.

Для замикання системи рівнянь було використано аналог рівняння безперервності:

$$\nabla^2 \Psi = \dot{W} + 2\dot{\Omega}, \quad (2)$$

де Ψ -векторна функція току.

Оскільки тиск не входить до основної системи рівнянь, його визначення становить окрему задачу, яка складається у вирішенні рівняння Пуассона для комплексу P :

$$\nabla^2 P = -tr(\nabla \bar{v} \cdot \nabla \bar{v}) + 2\bar{\Omega} \cdot \bar{w}, \quad (3)$$

де $P = p - \frac{1}{2}(\bar{\Omega} \cdot r)^2 - \frac{1}{2}\Omega^2 r^2$; p -тиск; tr -сума діагональних елементів матриці добутку.

Граничні умови задавалися у загальному вигляді як:

$$\begin{cases} \bar{\Psi} = \bar{\Psi}_B, \\ \bar{w} = (\nabla \times \bar{v})_B + 2\bar{\Omega}; \end{cases} \quad (4)$$

тобто компоненти завихреності та векторної функції току на границях розрахункового об'єму визначалися по значенням компонент швидкості у цих областях.

Останні визначалися таким засобом:

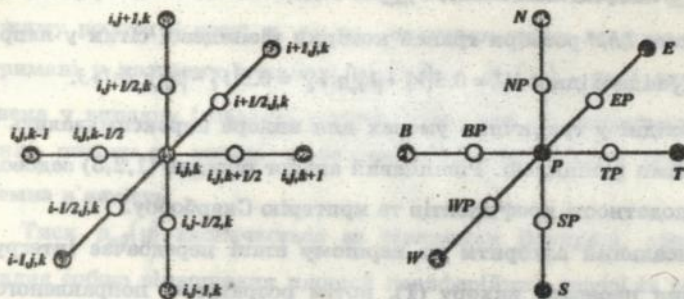
-на вході у розрахунковий об'єм, розташованому досить далеко від лопатей шнека (переріз B_1 , мал. 1а,б) так, що течію тут можна визнавати незбуреною, задавалася течія Куета, доповнена виразом для осової складової швидкості у відносному русі w_2 . Впливаючи через граничні умови, можна моделювати різні режими роботи ОШП за числом обертів та витратою;

-на лопатях шнека (позиція 2 мал. 1а,б) та на периферії (позиція 1) задані природні умови прилипання, враховуючи обертання периферії відносно системи координат, зв'язаної зі шнеком;

-у вихідному перерізі, де потік визнається повністю розвернутим у напрямі лопатей, задані нульові нормальні градієнти швидкостей;

-у перерізі 3-4,5-ої (мал. 1б) задані умови періодичності, введені в задачу для того, щоб добитися найбільш повного відповідання розрахунка реальній фізичній картині течії;

Для відновлення поля тиску на усіх границях розрахункового об'єму задаються нульові нормальні градієнти тиску.



Мал. 2. Шаблон різницевої схеми з вказанням індексації точок.

Для будування різницевої схеми вирішення рівнянь (1,2,3) використано інтегро-інтерполяційний метод А.А.Самарського. Конвективні члени апроксимовані різницями проти потоку, дифузійні - центральними різницями. Зважаючи на індексацію вузлів різницевої схеми, наведену на мал. 2, одержану різницеву схему для рівняння переносу завихренності можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{l_P} (V_{1EP}^+ H_2 H_3 \Phi_P - V_{1WP}^+ H_2 H_3 \Phi_W + V_{1EP}^- H_2 H_3 \Phi_E - V_{1WP}^- H_2 H_3 \Phi_P) + \\
 & \frac{1}{h_P} (V_{2NP}^+ H_1 H_3 \Phi_P - V_{2SP}^+ H_1 H_3 \Phi_S + V_{2NP}^- H_1 H_3 \Phi_N - V_{2SP}^- H_1 H_3 \Phi_P) + \\
 & \frac{1}{d_P} (V_{3TP}^+ H_1 H_2 \Phi_P - V_{3BP}^+ H_1 H_2 \Phi_B + V_{3TP}^- H_1 H_2 \Phi_T - V_{3BP}^- H_1 H_2 \Phi_P) = \\
 & = \frac{v_x}{l_P} \left[\left(\frac{H_2 H_3}{H_1} \right)_{EP} \frac{(\Phi_E - \Phi_P)}{l_E} - \left(\frac{H_2 H_3}{H_1} \right)_{WP} \frac{(\Phi_P - \Phi_W)}{l_W} \right] + \\
 & + \frac{v_x}{h_P} \left[\left(\frac{H_1 H_3}{H_2} \right)_{NP} \frac{(\Phi_N - \Phi_P)}{h_N} - \left(\frac{H_1 H_3}{H_2} \right)_{SP} \frac{(\Phi_P - \Phi_S)}{h_S} \right] + \\
 & + \frac{v_x}{d_P} \left[\left(\frac{H_1 H_2}{H_3} \right)_{TP} \frac{(\Phi_T - \Phi_P)}{d_T} - \left(\frac{H_1 H_2}{H_3} \right)_{BP} \frac{(\Phi_P - \Phi_B)}{d_B} \right] + D_P, \quad (5)
 \end{aligned}$$

де $\Pi_{1,2,3}$ -коефіцієнти Ламе; $V_{1,2,3}$ -складові швидкості; Φ -транспортна величина; l, h, d -розміри граней комірки різницевої сітки у напрямках ξ_1, ξ_2, ξ_3 відповідно; $V_l^+ = 0.5(V_l + |V_l|)$; $V_l^- = 0.5(V_l - |V_l|)$; $l = l+3$.

Похідні у граничних умовах для вихора апроксимувались трьохточечними різницями. Різницевий аналог рівнянь (1,2,3) задовольняє умові додатності коефіцієнтів та критерію Скарбороу.

Чисельний алгоритм на першому етапі передбачає інтегрування рівняння переносу вихору (1), потім розрахунок поправленого поля складових векторної функції току (2) та визначення нового поля швидкостей по обчислювальній граничній умові:

$$\vec{W} = \text{rot} \times \vec{\Psi}$$

для наступного кроку вирішення системи.

Максимальні розміри розрахункової сітки для ЕОМ ВЭСМ-6 склали $26 \times 9 \times 9$ (26 вузлів у напрямі ξ_1 , по 9 - у напрямках ξ_2 та ξ_3). При проведенні розрахунків на персональній ЕОМ АТ/386 розрешення сітки було поліпшено до $90 \times 9 \times 20$.

2.3. Особливості уявлення в'язкості при чисельному моделюванні просторової течії у осьовому шпекеровому передпасосі. Розроблений автором підхід до розрахунку трьохвимірної в'язкої течії у ОПП, базуючийся на вирішенні повних осереднених з Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стоксу, дозволяє по експериментальним напірним характеристикам ОПП різної геометрії отримати узагальнену залежність середньоінтегрального коефіцієнта турбулентної в'язкості від геометричних та режимних параметрів ОПП.

Вихідною передпосилкою метода визначення середньоінтегрального коефіцієнта турбулентної в'язкості служить припущення щодо пропорційності втрат тиску у міжплатевому каналі ОПП в'язкості потоку:

$$\frac{v_{cx} + v_1}{v_{cx} + v_2} = \frac{P_{ud}(\eta_1) - P_1}{P_{ud}(\eta_2) - P_2}$$

де v_1 та v_2 - в'язкості, задані у двох послідовних ОЕ для фіксованого режиму роботи насосу; p_1 та p_2 - значення тиску на виході з ОШП, отримані у кожному випадку; $p_{\text{вд}}(\eta_1)$ та $p_{\text{вд}}(\eta_2)$ - тиск на виході зі шнека у випадку ідеальної рідини, залежний від радіального підсилення потоку на виході η , зв'язаного з поворотними течіями; $v_{\text{сх}}$ - схемна в'язкість.

Тиск $p_{\text{вд}}(\eta)$ визначається за рівнянням Бернуллі, коефіцієнт η уявляє собою відношення площей периферійних перерізів рівної витрати на вході та на виході зі шнека.

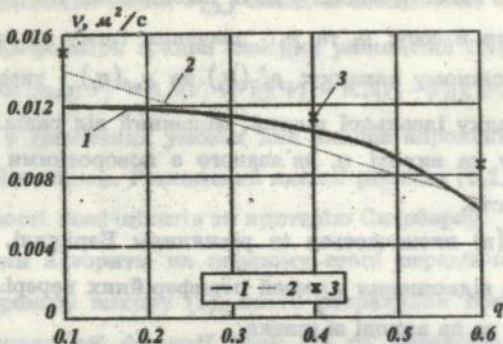
Після визначення схемної в'язкості по результатам двох послідовних ОЕ величина реальної в'язкості v_p , відповідної даному режиму, відновлюється з використанням експериментальної напірної характеристики $p_{\text{експ}}$.

Проведена серія ОЕ для чотирьох ОШП суттєво різної геометрії у широкому діапазоні параметру режиму $q=0.1+0.6$ дозволяє ввести узагальнюючий критерій Рейнольдсу у вигляді:

$$Re_{\text{FAT}} = \frac{u_{\text{осн}}(1-q)l}{v_p},$$

де $u_{\text{осн}}$ - окружна швидкість шнека на середньому радіусі; l - характеристична довжина, визначена як відношення об'єму міжопатевих каналів шнека до площі поверхні лопатей.

Величина запропонованого критерія Рейнольдсу склала 2442. На мал. 3 показано характерний вигляд залежності коефіцієнту турбулентної в'язкості від параметру режиму та нанесена пряма, відповідна постійному Re_{FAT} .



Мал. 3. Залежність схемної та реальної в'язкості від режиму роботи ОПП. 1-схемна в'язкість; 2-реальна в'язкість; 3-розрахунок по $k-\epsilon$ моделі турбулентності.

Верифікація запропонованого підходу до уявлення в'язкості, проведена шляхом окремого інтегрування стаціонарних рівнянь $k-\epsilon$ моделі турбулентності, підтвердила коректність обчислювально-експериментальної методики визначення в'язкості трьохвимірного потоку у ОПП (див. мал. 3).

2.4. Механізм виникнення поворотних течій у осьовому шнековому переднаосі при малих витратах. Уявлення про причини поворотних течій на вході в ОПП, які склалися на даний момент, не дозволяють пояснити деякі особливості поведінки поворотних течій, спостерігаемі в ряді експериментів. Перш за все, мова йде про такі явища, як:

-затримання моменту зникнення ПТ із збільшенням витрати для шнека з великим втулковим відношенням, коли поворотні течії спостерігались при витраті, відповідній параметру режиму, значно перевищуючому теоретично визначений $q_{пт}$ (експерименти проводились у ГТМ АН України під керівництвом академіка В.В.Пилипенка);

-зменшення інтенсивності ПТ при зниженні тиску на вході у ОШП, у той час як аналітичні залежності для визначення інтенсивності ПТ не включають вхідний тиск.

Автором був здійснений спеціальний ОЕ для уточнення гіпотез про причини ПТ.

Попередній аналіз рівнянь руху (1) свідчить про те, що одна відцентрова сила не може бути джерелом поворотних течій. Як вже вказувалось, обрана форма запису рівнянь руху інваріантна відносно обертання системи координат, бо рівняння (1) укупі з граничними умовами (4), куди входить коріолісова сила повністю визначають поле швидкостей у відносному русі незалежно від відцентрової сили.

Побудова балансу сил, впливаючих на частку рідини у комірці різницевої схеми, за результатами розрахунку течії у об'єднаному шнеку на режимі нульової подачі дозволяє зробити такі висновки:

-у вхідному трубопроводі перед лопатями шнека радіальні швидкості у всіх випадках достатньо малі, що підтверджує баланс сил у радіальному напрямі:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \omega^2 r + 2\omega w_{\varphi} \approx -\frac{w^2}{r};$$

-при вході у міжлопатевий канал градієнт тиску змінюється незначно у окружному напрямі, а проекція коріолісової сили $2\omega w_{\varphi}$ різко зменшується поблизу лопатей, що приводить до розбалансу сил та виникненню радіальних течій поблизу лопатей, спрямованих до периферії шнека. Найбільш потужні радіальні течії поблизу всасуючої сторони лопаті обумовлені наявністю тут застійної зони при обтіканні лопатей з позитивними кутами атаки;

-вказані радіальні потоки розвертаються біля стінки корпусу та приводять до виникнення ПТ на вході у переднос. На можливість такої течії уперше вказав Пфлейдерер.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Уточнений механізм виникнення ПТ дозволяє пояснити як затримання моменту зникнення ПТ (величина втулкового відношення відіграє меншу роль, ніж гальмування потоку поблизу лопатей), так і зменшення інтенсивності ПТ при розвитку кавітації у шнеку (потік поблизу каверни не гальмується).

2.5. Методика пошуку джерела поворотних течій. Кількісні характеристики течії, отримані у ході ОЕ, дозволяють визначити місцеположення та інтенсивність джерела ПТ на циліндричній поверхні розгортки проточної частини шнека. Ці параметри визначаються таким чином: для "розбалансованого" рівняння безперервності, записаного на циліндричній поверхні $\varphi - z$ ($t_0 = const$) у вигляді:

$$\frac{\partial w_{\varphi}}{r_0 \partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = I_{max}$$

отшукуються місцеположення та значність максимуму "розузгодження" I_{max} . Саме у цьому місці на поверхні $r_0 = const$ радіальний потік досягає свого максимуму.

2.6. Вирішення задачі про моделювання просторової кавітаційної течії у осьовому шнековому передпасосі на основі рівнянь Нав'є-Стоксу. Найбільш коректним підходом до моделювання кавітаційної течії у проточній частині ОПП, що дозволяє облічити просторові та в'язкі ефекти у потоку, є використання повних трьохвимірних рівнянь Нав'є-Стоксу. Реалізація вказаної задачі включає:

- вибір форми запису основних рівнянь математичної моделі;
- механізм пошуку зон розриву безперервності рідини;
- формулювання граничних умов на поверхні розділу фаз;
- ітераційний процес уточнення границі розділу фаз до досягнення фіксованої просторової форми.

Основою для вибору форми запису основних рівнянь математичної моделі просторової кавітаційної течії у каналах ОПП послужили

роботи С.С.Кутателадзе, де рівняння переносу для парогазової суміші вводитья як сума руху рідкої та газоподібної фази:

$$\rho' \left[\frac{\partial \bar{V}'}{\partial t} + (1 - \varphi)(\bar{V}' \cdot \text{grad})\bar{V}' \right] + \rho'' \left[\frac{\partial \bar{V}''}{\partial t} + \varphi(\bar{V}'' \cdot \text{grad})\bar{V}'' + \bar{V}'' \text{div} \bar{V}'' \right] = - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_m, \quad (6)$$

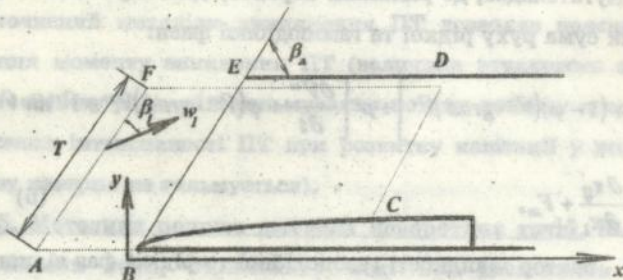
де \bar{V}' та \bar{V}'' - вектор швидкості газоподібної та рідкої фаз відповідно; t - час; ρ' та ρ'' - густина рідини та пари відповідно; τ_{ij} -компоненти тензора в'язких напруг; x_i -просторові координати; F_m -масові сили; φ -миттєвий істинний паровміст, рівний відношенню площі, зайнятої паром до прохідного перерізу каналу.

Після переформулювання у змінних "вихор-векторна функція току, рівняння (6) дає:

$$(1 - \varphi)[(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{W} + (\bar{W} \cdot \nabla)\bar{v}] = \nu_1 \nabla^2 \bar{W}. \quad (7)$$

Замикання математичної моделі кавітаційної течії здійснюється шляхом введення процедури визначення форми просторового кавітаційного утворення усередені розрахункового об'єму. На жаль, реалізація прямого чисельного моделювання вищкнення та росту каверни не уявляється можливою через те, що виникає сумнів у здатності рівнянь Нав'є-Стоксу описувати процеси, що відбуваються усередені кавітаційних полостей.

Для визначення форми каверни було обрано методику, засновану на використанні інтегральних законів зберігання. Відмітною особливістю даної методики з'являється відсутність попередньо заповзятої схеми замикання каверни, вибір якої уявляє самостійну проблему. Ця методика застосовує модель ідеальної рідини та дозволяє визначити форму тільки для ослої каверни на циліндричній розгортці міжлопатевого каналу шнека (див. мал. 4).



Мал. 4. Схема кавітаційного обтікання решітки пластин.

Після запису інтегральних законів зберігання, стосовно до контрольного об'єму $ABCDEF$ (див. мал. 4) методом продовження по параметру, була отримана така система звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{du}{dx} = \frac{16v_k \chi_1 \chi_2 - 12k \cos \beta_A \chi_1 - v_k^3 \cos^2 \beta_A}{4u(3 \cos^2 \beta_A \chi_1 + 4 \sin^2 \beta_A \chi_2)} e^\xi, \\ \frac{dv_k}{dx} = \frac{2 \sin \beta_A}{\cos \beta_A} \frac{du}{dx} - \frac{2v_k \chi_1}{u \sin \beta_A \cos \beta_A e^\xi}, \\ \frac{dk}{dx} = -\frac{2\chi_1}{\sin \beta_A} \frac{du}{dx} + \frac{kv_k}{u \sin \beta_A e^\xi}, \\ \frac{d\xi}{dx} = -\frac{v_k}{u \sin \beta_A e^\xi}, \end{cases} \quad (8)$$

де: $\chi_1 = u \sin \beta_A - \frac{v_k}{2} \cos \beta_A$, $\chi_2 = u \sin \beta_A - \frac{7}{8} v_k \cos \beta_A$, $\xi = \ln T_w$, $T_w = T - \frac{y_k}{\sin \beta_A}$; k -

місцеве число кавітації $k = \frac{2(p - p_k)}{\rho w_{1x}^2}$; $w_{1x} = \text{const}$ - певна характерна швидкість; інші позначення зрозумілі з мал. 4.

На лінії розділу фаз формулюються граничні умови ковзання:

$$\text{pw}_\tau = 0; \quad \text{w}_n = 0,$$

де n - нормаль до поверхні розділу фаз; w_n , w_n - повні складові швидкості дотичної та нормальної до границі поділу фаз відповідно.

Ітераційний процес уточнення форми каверни припускає:

- проведення вихідного розрахунку гідродинамічних параметрів течії в ОШП на безкавітаційному режимі;

- визначення кута течії та місцевого числа кавітації на вході у міжлопатевий канал шнека;

- розрахунок контура каверни по системі (8);

- інтегрування рівняння (7) за методикою, розробленою для чисельного вирішення повних трьохвимірних рівнянь Нав'є-Стоксу;

- уточнення значень кута течії та місцевого числа кавітації на вході, повернення до визначення форми каверни та інтегрування рівняння (7) до досягнення фіксованої форми каверни.

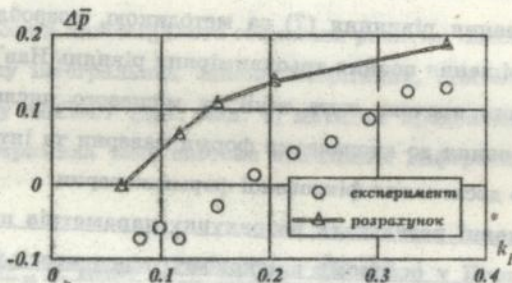
2.7. Основні результати розрахунку параметрів просторової кавітаційної течії у осьовому шнековому переднаосі. Після серії ОЕ для режимів по витрачання $q=0.43; 0.52; 0.6$ та входному тиску p_1 , що змінюється у діапазоні, відповідному числу кавітації на вході k_1 у межах $k_1=0.35 \pm 0.02$, побудовані залежності об'єму V_k та пружності

$(B_1 = \frac{1}{\frac{\partial V_k}{\partial p_1}})$ кавітаційних каверн, негативного кавітаційного опору

$(B_2 = - \left(\frac{\partial V_k}{\partial n} / \frac{\partial V_k}{\partial p_1} \right))$ від p_1 . Порівняння зазначених результатів з роз-

рахунками за методикою В.В.Пилипенка свідчить про їх задовільне узгодження. Деяка розбіжність у залежностях $B_2(k_1)$ пов'язана із врахуванням у розробленій методиці в'язкої картини розподілу кутів атаки течії по радіусу шнека.

Уперше теоретичним методом була простежена залежність інтенсивності ПТ від ступеню розвитку кавітації. Мал. 5 ілюструє падіння інтенсивності ПТ з падінням P_1 , обумовлене ростом довжини профільної кавітації, перешкоджуючим різкому падінню сили Коріоліса $2\Omega\omega_\phi$ поблизу твердої стінки та зберігаючим незмінним баланс радіальних сил у середині міжлопатевого каналу.



Мал. 5. Залежність інтенсивності поворотних течій на вході у насос від ступеню розвитку кавітації.

ВИСНОВКИ

1. Уперше позні трьохвимірні осереднені з Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стоксу у змінних "вихор-векторна функція току" застосовані у якості математичної моделі для розрахунку просторової в'язкої течії в ОШП.

2. На основі інтегро-інтерполяційного методу розроблено різницеву схему рішення повних трьохвимірних рівнянь Нав'є-Стоксу у змінних "вихор-векторна функція току". Для забезпечення стійкості різницевої схеми при апроксимації конвективних членів у рівнянні переносу вихора використовані різниці проти течії.

Розрахунковим шляхом визначені оптимальні значення коефіцієнтів релаксації різницевих рівнянь для вихора та векторної функції току, коефіцієнти релаксації джерелових членів у вихідних рівнян-

нях, які в сполученні з простими граничними умовами для вихора на твердій стінці забезпечують стійкість та збіжність різнигової схеми.

Построений обчислювальний алгоритм має інваріантність відносно неінверціальності системи координат та вільний від труднощів, пов'язаних з інтегруванням поля тиску.

3. Запропоновано нову методику по рахунку просторової в'язкої течії в ОШП, дозволяючу моделювати практично усі експериментально спостережені на безкавітаційних режимах особливості течії та прогнозувати енергетичні характеристики ОШП.

4. Запропоновано просту обчислювально-експериментальну методику, дозволяючу отримати залежність схеми та реальної в'язкості течії в ОШП від параметру режиму у рамках підходу, приймаючого в'язкість течії постійною по всьому розрахунковому об'єму.

5. На основі обробки результатів розрахунку течії у ОШП по вказаній методиці сформовано комплекс, що має смисл числа Рейнольдсу для ОШП, виявлений постійним для переднасосів у широкому діапазоні конструктивних параметрів. Одержаним узагальненим значенням числа Рейнольдсу можна користуватись при чисельному моделюванні просторової течії у ОШП для підвищення достовірності прогнозування енергетичних характеристик.

6. Розроблено просту методику, дозволяючу по відомим кількісним характеристикам просторової в'язкої течії в ОШП знаходити місцеположення джерела поворотних течій.

7. З притягненням кількісних даних спеціального ОЕ з'ясовані та уточнені подробиці механізму зародження та розвитку ПТ на вході в ОШП. Розрахунковим шляхом підтверджена одна з вказаних гіпотез про виникнення поворотних течій.

8. Розроблено модифікацію методики розрахунку просторової в'язкої течії в ОШП, дозволяючу у першому наближенні урахувувати вплив кавітації на параметри течії та енергетичні характеристики

переднаосу. Вперше теоретичним методом оцінено вплив розвитку кавітації у каналах ОШП на інтенсивність поворотних течій.

Список публікацій

1. О причинах возникновения и структуре обратных токов на входе в осевой шнекозый преднасос// Изв. высших учебных заведений. Машиностроение.- 1991, № 1-3, с. 25-29. (у співавторстві).

2. Особенности представления вязкости при численном моделировании пространственного течения в осевых шнековых преднасосах// Изв. высших учебных заведений. Энергетика.- 1991, № 10, с. 96-99. (у співавторстві).

3. Проблемы численного моделирования трехмерного вязкого потока в осевых шнековых преднасосах// Моделирование процессов гидрогазодинамики и энергетики.- Новосибирск.- 1991. (в печати) (у співавторстві).

4. Развитие подходов к численному моделированию пространственного обтекания лопастных систем/ Тез. докл. научн.- техн. конф. "Проблемы динамики пневмогидравлических и топливных систем летательных аппаратов".- Куйбышев.- 1990.- С.41-42. (у співавторстві).

5. Расчет трехмерного вязкого потока в осевых шнековых преднасосах// Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт.- 1990.- №6.- С.115-121. (у співавторстві).

6. Численное моделирование трехмерного вязкого течения в осевых шнековых преднасосах на режимах с обратными токами// Динамика гидросистем энергетических установок летательных аппаратов.- Киев: Наукова думка.- 1991.- С.97-104 (у співавторстві).

7. Моделирование течения в лопастном насосе РД// Спецборник ИТМ АН Украины.- Днепропетровск.- 1992.- С.71-83. (у співавторстві).

8. Исследование гидродинамики осевых шнековых преднасосов нетрадиционных конструкций// Техническая механика. Вып. 2.- Киев: Наукова думка.-1993.- С.76-80. (у співавторстві).

9. Влияние конструктивных параметров осевых шнековых преднасосов на особенности вязкого трехмерного течения// "Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов".- Киев: Наукова думка.- 1992.- С.108-114.

10. Моделирование пространственного вязкого течения в осевом шнековом преднасосе, включающем устройства по подавлению кавитационных колебаний// Тез. докл. Всесоюзного семинара по динамике пространственных и неравновесных течений жидкости и газа.- Челябинск-Миасс.- 1991.- С.88-90.

11. Расчет трехмерного вязкого потока в осевых шнековых преднасосах с применением ПЭВМ// Тез. докл. II Всесоюзной научно - практ. конф. "Практическое применение современных технологий программирования, пакетов прикладных программ в вычислительных системах и сетях ЭВМ".- Днепропетровск.- 1990.- С.36-38.

12. Численное моделирование трехмерного вязкого потока в двухрядном осевом шнековом преднасосе// "Динамика гидромеханических систем летательных аппаратов".- Киев: Наукова думка.- 1992.- С.104-108.

13. Numerical Simulation of 2D Unsteady Cavitation Flow// 2nd Russian-Sino Symposium on Astronautical Science and Technique.- Samara.- 1992.- P. 35. (у співавторстві).

001. 1111 P 5 302 172 11111

46068

AB 29.315