

УДК 621.311.21-184.4

Нестеренко В. П., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯ ШВИДКОСТЕЙ ПОТОКУ У ВХІДНІЙ ЧАСТИНІ БЛОКА З ГОРИЗОНТАЛЬНИМ КАПСУЛЬНИМ ГІДРОАГРЕГАТОМ

Наведена методика, результати розрахунків з застосуванням метода скінченних елементів і дані експериментальних досліджень в розрахунковому режимі поля швидкостей потенціальних потоків – повітряного і води в підводі дослідженого блока з горизонтальним капсульним гідроагрегатом.

Ключові слова: поле швидкостей, вхідна частина (вхід), метод скінченних елементів, блок, капсульний гідроагрегат.

Вступ

Вхідна частина гідроагрегатних блоків як насосних, так і гідротурбінних є основним елементом, що формує потоки на вході в їх направляючі апарати (НА) і на робочі колеса (РК). Умови роботи і втрати енергії в цих частинах гідроагрегатних блоків в значній мірі залежать від гідравлічних характеристик потоків, що формуються в них. Тому ці характеристики вхідних частин різних гідроагрегатних блоків потребують всебічних досліджень.

Аналіз останніх досліджень

Відомо, що поки не існує достатньо точних аналітичних способів розрахунку структури потоків в підводах різних гідроагрегатних блоків і тому основою для їх розробки являють експериментальні дослідження. Але для попередньої оцінки гідравлічних характеристик потоків в підводах успішно застосовуються наближені методи розрахунку, що підвищує якість їх досліджень і проектування, а також скорочує строки розробки.

Відомо, що потоки у вхідних частинах гідроагрегатних блоків в розрахункових режимах вважаються безвихоровими [8], тому для їх розрахунків можна застосовувати відомі методи, які використовуються для потенціальних течій [3, 7].

В різних областях механіки для числового рішення задач, які описуються диференційними рівняннями в частинних похідних, застосовується одна з модифікацій варіаційних методів – метод скінченних елементів (МСЕ). Суттєвою позитивною якістю його є універсальність,

що дає можливість використовувати одні і ті ж алгоритми і програми для рішення різних задач.

МСЕ може застосовуватись як для розрахунків потенціальних течій, так і для числового рішення рівнянь Нав'є – Стокса [3, 7].

Методика досліджень

В даній роботі представлені методика, результати розрахунків з застосуванням МСЕ і дані експериментальних досліджень поля швидкостей сталих потоків – повітряного і водного – в підводі дослідженого блока з капсульним горизонтальним агрегатом (ГКА). При цьому прийнято ряд спрощень:

1) опорні, підтримуючі і статорні колони в підводі розглянутого гідроагрегатного блока відсутні;

2) потік в підводі гідроагрегатного блока рахується безвихорим, тобто таким, що має потенціал швидкості φ ;

3) вода нев'язка.

З урахуванням вище наведеного, задача по розрахунку обмеженого просторового потенціального обтікання тіла (капсули гідроагрегатного блока в його підводі – рис. 1, 6) зводиться до знаходження потенціала швидкості φ як рішення рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (1)$$

з граничними умовами Дирихле

$$\varphi = \bar{\varphi} \quad (2)$$

і Неймана

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \bar{q}, \quad (3)$$

заданими на різних частинах границі ($\bar{\varphi}$ і \bar{q} відомі значення).

На основі отриманих значень φ визначаються швидкості в точках потоку, що цікавлять розробників гідромашин.

Згідно варіаційного формулювання задача, що описується рівняннями (1...3), еквівалентна визначенню мінімуму наступного функціонала [2, 3]:

$$E_{\varphi} \left(\varphi, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \iiint_V \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dV - \int_S \bar{q} \varphi dS, \quad (5)$$

де V – область течії; S – границі течії; n – зовнішня до області V нормаль в точках поверхні, що обмежує область V .

Згідно прийнятої розрахункової схеми і прийнятих допущень рахуємо потік в досліджуваному підводі гідроагрегатного блока вісесиметричним. Тоді з врахуванням, що $r^2 = Z^2 + y^2$; $dV = 2\pi r dr dx$; $dS = 2\pi r dl$ (dl – диференціал дуги контура твердих границь) рівняння (5) прийме вигляд:

$$E_\varphi \left(\varphi, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = \frac{1}{2} \iint_\Omega \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 \right] 2\pi r dr dx + \int_S 2\pi r \bar{q} \varphi dl. \quad (6)$$

Таким чином, тривимірна вісесиметрична задача (5) перетворюється в двовірну (6) і при застосуванні МСЕ може бути вирішена з використанням двовірного елемента.

Розрахункова схема для умов вісесиметричної задачі обмеженого потенціального обтікання капсули показана на рис. 1.

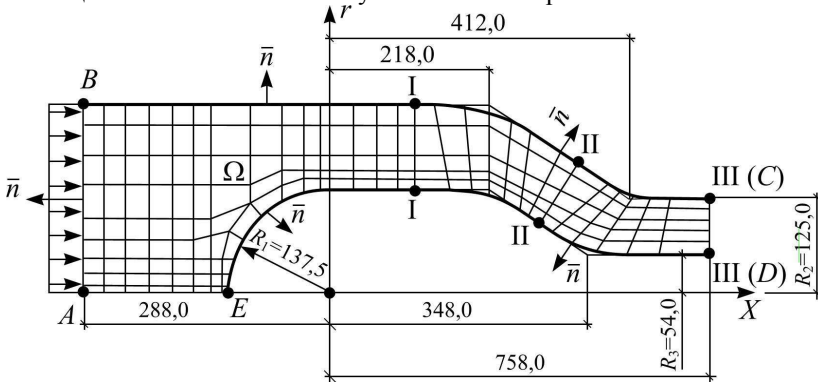


Рис. 1. Розрахункова схема вісесиметричної задачі потенціального обтікання капсули в обмеженому каналі і схема розбивки досліджуваної області на скінченні елементи

При цьому задача (6) зводиться до визначення потенціала φ і швидкостей у потоці в області Ω і формулюється наступним чином:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = 0 \quad (7)$$

з граничними умовами:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \Big|_{S_{CD}, S_{DE}}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -1 \Big|_{S_{AB}} \quad (9)$$

Задача (7...9) рішається з точністю до постійної похідної, тому для забезпечення єдиного розв'язку рівняння (7), на якій-небудь еквіпотенціальній поверхні задається значення потенціалу φ :

$$\varphi \Big|_{S_{CD}} = 0. \quad (10)$$

Рішення системи рівнянь (7...9) еквівалентне мінімізації функціонала (6) [3, 7].

З (8...10) виходить, що останній інтеграл у виразі (6) необхідно визначити лише на AB .

Для мінімізації функціонала (6) застосовується МСЕ [3, 7]. При цьому область (проточна частина гідроагрегатного блоку) розбивається на чотирикутні ізопараметричні елементи (рис. 1), що при достатньо високій точності рішення потребує меншої кількості елементів, і, відповідно зменшує кількість вихідної інформації. В межах кожного елемента φ представляється кубічною інтерполяційною функцією від x і r [3].

Після введення конечно-елементних представлень згідно [3, 7] функціонал (6) перетворюється в лінійну систему рівнянь з симетричною стрічковою матрицею коефіцієнтів. При цьому загальне рівняння для всієї області, що розглядається, приводиться до наступного матричного вигляду [3, 7]:

$$[N]\{\varphi\} = \{F\}, \quad (11)$$

де N – матриця порядку $(m \times m)$, елементи якої є функціями координат вузлів; φ – матриця стовбців порядку $(m \times 1)$, елементи якої є значеннями рішення $\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_m$; F – вектор стовпець порядку $(m \times 1)$, ненульові елементи якого визначаються заданими граничними умовами; m – порядок системи рівнянь, що визначається кількістю вузлів всіх елементів розбивки розглянутої області.

Розрахункова схема прийнята в даній роботі геометрично подібна вхідній частині (підводу) експериментально дослідженого гідроагрега-

тного блока закритого типу. Вказана подібність незначно порушається на початковій частині вхідної частини блоку, виконаної для досліджуваної моделі як перехід з прямокутного перерізу на круглий (рис. 6).

Для числового рішення представленої задачі використані алгоритм і програма [6]. Розглянута область – підвод модельного гідроагрегатного блока з горизонтальним капсульним насосом, умовно розбивався на 173 кінцевих елемента з 212 кутовими вузлами. Порядок рішення системи рівнянь дорівнював 980.

Результати досліджень

Отримані результати розрахунків представлені в графічній формі на рис. 2...4, де показані графіки зміни осьових швидкостей руху води (v_p) в розрахункових точках перерізів III-III, II-II і I-I (рис. 6). Перші два з цих перерізів характеризують, відповідно вхід потоку на робоче колесо (РК) гідроагрегатного блока і на лопаті направляючого апарата (НА), а переріз I-I – потік в тій частині підводу, що формує потік на вході в НА (рис. 1, 6). Характер розподілу швидкостей в цих перерізах є визначальним як для розрахунку лопатевих систем (РК і НА), так і для енергетичних показників гідроагрегатного блока в насосному режимі. При цьому на рис. 2...4 $\bar{v}_p = v_{p,roz.i} / v_{p,roz.cer}$.

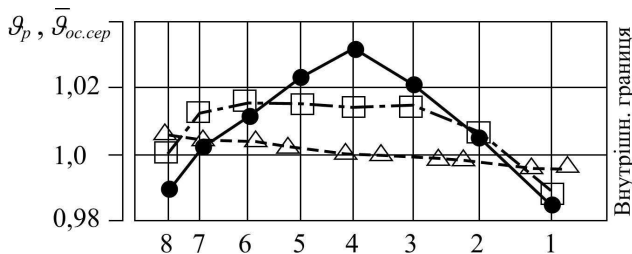


Рис. 2. Розрахункові й осереднені осьові швидкості у перерізі III-III:
 △ – результати розрахунку; ● – результати гідралічних досліджень;
 □ – результати досліджень на повітряному стенді

Аналіз отриманих даних (рис. 2) показує, що в перерізі III-III (рис. 1, 6) спостерігається практично рівношвидкісне поле з невеликим збільшенням швидкостей потоку на зовнішній границі перерізу. Максимальна різниця швидкостей у втулки РК і внутрішньої поверхні його камери не перевищує 1%. В перерізі II-II (рис. 1, 6) спостерігається набагато більша нерівномірність швидкостей потоку, яка має таку ж тенденцію збільшення в напрямку до зовнішньої границі перерізу (рис. 3). Максимальна різниця швидкостей в цьому перерізі складає приблизно 11%. Зовсім інший характер має швидкісне поле в перерізі I-I

(рис. 1, 6), де спостерігається зменшення швидкості в зворотному напрямку відносно двох попередніх перерізів – швидкість потоку зменшується в напрямку до внутрішньої границі перерізу (рис. 4). При цьому максимальна різниця швидкостей складає $\approx 8\%$.

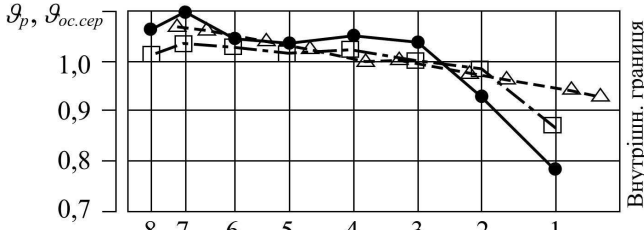


Рис. 3. Розрахункові й осереднені осьові швидкості у перерізі II-II (позначення аналогічні рис. 2)

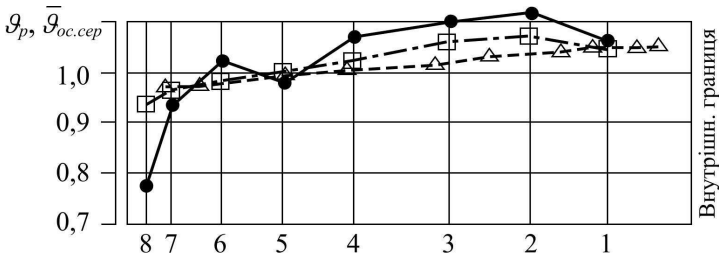


Рис. 4. Розрахункові й осереднені осьові швидкості у перерізі I-I (позначення аналогічні рис. 2)

Отримані розрахункові дані добре узгоджуються з відомою роботою [3].

Для перевірки отриманих розрахункових даних були проведені дослідження на аеродинамічному стенді (рис. 5) по експериментальному визначенню швидкостей в підводі гідроагрегатного блока аналогічно прийнятій розрахунковій схемі згідно методики [2, 4, 5].

Застосовані при цьому шарові п'ятиканальні зонди дозволяють визначати в намічених точках значення абсолютної швидкості потоку (води або повітря) і її проєкцій – осьову, колову і радіальні швидкості, тобто структуру потоку в окремих точках відповідних характерних перерізів. При цьому досліджені перерізи потоків умовно розбивались на 8-м рівновеликих кільцевих площадок з вимірювальними точками в їх центрах. Зондування потоку проводилось вздовж 8-ми радіальних створів досліджувальних перерізів, тобто загальна кількість точок

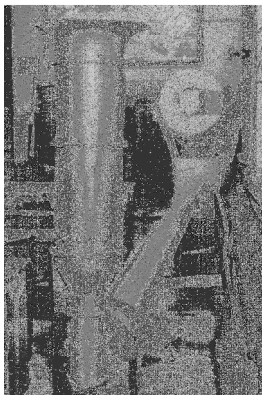


Рис. 5. Аеродинамічний стенд з модельним блоком

установок зондів дорівнювала 64, що значно підвищило точність проведених досліджень. Для визначення по них інтегральних характеристик середніх швидкостей застосований метод осереднення за площами кільцевих площадок.

Для оцінки точності проведеного експериментального вимірювання швидкостей розраховані наступні показники.

Гідравлічні дослідження: відносна середньоквадратична похибка осьових складових абсолютної швидкості

$$\sigma_{v_{oc}} = (1,0...5,5)\%$$

Дослідження на аеродинамічному стенді: відносна середньоквадратична

похибка вимірювання абсолютних швидкостей $\sigma_{v_{oc}} = (0,5...3,0)\%$.

При цьому в дослідах колові і радіальні складові абсолютних швидкостей практично були відсутні).

Відносна середньоквадратична похибка $\sigma_{v_{oc.cep}}$ підрахунку середньої осьової швидкості $v_{oc.cep}$ дорівнює $\sigma_{v_{oc.cep}} = (0,1...1,2)\%$;

Отримані результати засвідчили, що дослідження проведені з точністю, яка відповідає сучасним вимогам [2, 4].

Результати досліджень на аеродинамічному стенді представлені на рис. 2...4 ($\bar{v}_{oc.cep} = v_{oc.i} / v_{oc.cep}$). Порівняння отриманих даних з розрахунковими показує їх достатньо хорошу збіжність. Так, для перерізу I-I (рис. 1, 6) при загальному співпадінні характеру обох кривих максимальна різниця в швидкостях складає приблизно 3% (рис. 4). В перерізі II-II (рис. 1, 6) при співпадінні характеру порівнювальних кривих максимальна різниця між ними складає приблизно 7% (рис. 3) (внутрішня границя пристіночної зони). В перерізі III-III (рис. 1, 6) відмінність в розрахунках і експериментальних даних не перевищує 2%, а характер експериментальної кривої в цілому відповідає характеру розрахункової залежності при невеликій різниці в пристіночних зонах (рис. 2).

Оскільки представлена робота мала на меті визначення можливості застосування МСЕ для розрахунку поля швидкостей в підводах ГКА, були проведені гідравлічні дослідження поля швидкостей у вхідній частині (підводі) модельного блока ГКА (рис. 6) в перерізах аналогічних

попередньо дослідженим. При цьому режим роботи гідроагрегатного блока, при якому проводились вказані дослідження, був змодельований у відповідності до проведених числових розрахунків і дослідів на аеродинамічному стенді. Методика проведених гідравлічних досліджень аналогічна дослідів на аеродинамічному стенді.

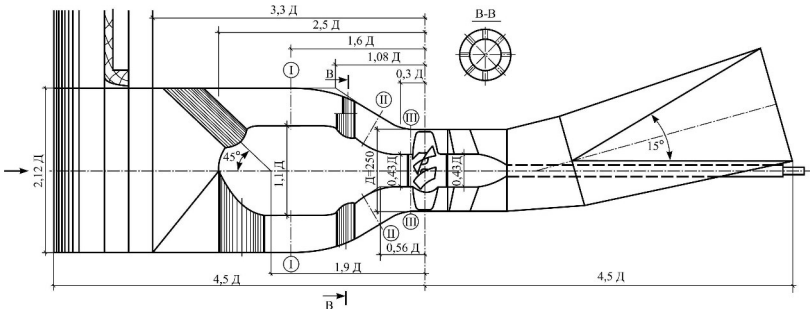


Рис. 6. Схема дослідженого модельного блока з горизонтальним капсульним гідроагрегатом

Відмітимо, що розподіл швидкостей на вході в гідроагрегатний блок не був рівномірним – спостерігалось зменшення швидкостей в напрямку від верхньої вхідної крайки до поперечної вісі симетрії вхідного перерізу. Максимальна різниця швидкостей дорівнює приблизно 20%.

Порівняльний аналіз отриманих експериментальних і розрахункових даних показав, що тут є значна різниця. Так, для перерізу I-I (рис. 1, 6) при загальному співпадінні характеру змін швидкостей, різниця в їх значеннях досягає (8...20)%, більше значення відповідає точкам розташованим ближче до зовнішньої стінки розглянутого перерізу (рис. 4). Для перерізу II-II (рис. 1, 6) видно, що експериментально отримана залежність має такий же характер, як і розрахункова. При цьому різниця в значеннях швидкостей досягає (6...18)%; більше значення відповідає точкам, розташованим ближче до внутрішньої стінки розглянутого перерізу (рис. 3). В перерізі III-III (рис. 1, 6) максимальна різниця в значеннях швидкостей, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом, складає $\approx 4\%$, про те тут має місце різниця в характері розподілу швидкостей (рис. 2). Для експериментально отриманої залежності характерно збільшення швидкостей в середній частині розглянутого перерізу, тоді як розрахункова залежність має характер плавного збільшення швидкостей в напрямку від внутрішньої до зовнішньої стінки.

Таким чином, отримані дані показали, що результати розрахунків розподілу швидкостей в насосному режимі гідроагрегатного блока з ГКА закритого типу не співпадають з результатами його експериментальних досліджень. Пояснюється це, в першу чергу, тим, що в прийнятій розрахунковій схемі не враховані статорні і підтримуючі колони, які мають місце в реальних умовах (рис. 6). Крім того, отриману різницю можна пояснити також тим, що при експерименті як і в реальних умовах розподіл швидкостей на вході в блок нерівномірний. Для розрахункової же схеми умова рівномірності швидкостей на вході була прийнята в якості граничних умов.

Висновки

Проведені дослідження показали, що застосування розглянутого числового метода розрахунку МСЕ швидкостей для умов вісесиметричного обмеженого потенціального обтікання капсулевидних тіл дає результати практично однакові з експериментальними, виконаними з додержанням всіх умов розрахункової схеми.

Застосування розглянутого МСЕ для розрахунку течій в підводах ГКА потребує подальшого вдосконалення і в представленому вигляді може бути рекомендований лише як попередній з обов'язковою експериментальною перевіркою. Для вдосконалення МСЕ при рішенні задач по розрахунку течії в підводах ГКА необхідно враховувати наявність статорних і підтримуючих колон, тобто задача повинна розв'язуватись в тримірній постановці. Крім того, в розрахункових схемах повинен враховуватись реальний розподіл швидкостей на вході в гідроагрегатні блоки.

1. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике. Пер. с англ.; Под ред. В. Е. Победри / О. К. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
2. Золотов С. С. Аэродинамика судовой вентиляции / С. С. Золотов. – Л. : Судостроение, – 1967. – 308 с.
3. Коннор Дж. Метод конечных элементов в механике жид кости. Пер. с англ.; Под ред. В. А. Постнова / Дж. Коннор, К. Бреббиа. – Л. : Судостроение, 1979. – 214 с.
4. Повх И. Л. Аэродинамика. Руководство к лабораторным работам / И. Л. Повх. – Л. : ЛПИ, 1962. – 125 с.
5. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – Л. : Машиностроение, 1974. – 469 с.
6. Программа «FEMAX» расчета осесимметричного потенциального обтекания тел методом конечных элементов // Текст программы. 2066388.00360-01.12.01. Л. / ЛКИ. – 1997.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ. / под ред. В. Е. Победри. / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
8. Степанов А. И. Центробежные и осевые насосы / А. И. Степанов. – М. : Машгиз, 1960. – 463 с.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

Nesterenko V. P., Candidate of Engineering, Associate Professor

(National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

RESEARCH OF THE FLOW VELOCITIES FIELD IN THE INPUT OF THE UNIT OF HORIZONTAL CAPSULAR HYDROUNIT

Procedure, results of calculations by using the method of terminal elements and data of experimental investigation under design conditions of velocity field of invariable air and water flows in the entrance part of investigated block with horizontal capsule hydrounit.

Keywords: velocity field, input of, terminal elements method, block, capsule hydrounit.

Нестеренко В. П., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА ВО ВХОДНОЙ ЧАСТИ БЛОКА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ КАПСУЛЬНЫМ ГИДРОАГРЕГАТОМ

Приведена методика, результаты расчетов с применением метода конечных элементов и данные экспериментальных исследований в расчетном режиме поля скоростей потенциальных потоков – воздушного и воды в подводе исследованного блока с горизонтальным капсульным гидроагрегатом.

Ключевые слова: поле скоростей, входная часть (вход), метод конечных элементов, капсульный гидроагрегат.
