

В.В. Шендрик, к.т.н., доцент, О.В. Алексенко, к.т.н., доцент, Н.О. Зінченко, аспірант, І.А. Гордієнко, студент (Сумський державний університет. Україна)

Аналіз можливостей використання методик проектування відцентрових насосів в автоматизованій системі

В статті розглядається можливість використання різних методів проектування центробежних насосів в контексті їх використання в системі автоматизованого проектування. Виконано сопоставлення расчетных характеристик насоса с экспериментальными.

Ключевые слова: центробежные насосы, автоматизированное проектирование, характеристики насосов, методы проектирования насосов.

У статті розглядається можливість використання різних методів проектування відцентрових насосів в контексті їх використання в системі автоматизованого проектування. Виконано зіставлення розрахункових характеристик насоса з експериментальними.

Ключові слова: відцентрові насоси, автоматизоване проектування, характеристики насосів, методи проектування насосів.

The article deals with the possibility of using different methods of design of centrifugal pumps in the context of their use in computer-aided design, it is carried out a comparison of calculated and experimental characteristics of the pump.

Keywords: centrifugal pumps, computer-aided design, characteristics of pumps, pump design methods.

Відцентрові насоси відносяться до найбільш поширеного виду енергетичних машин. Проектування таких насосів полягає у виборі внутрішніх параметрів (поєднання геометричних розмірів елементів) проточних частин за обумовленим технічним завданням на проектування насоса значенням вихідних параметрів (подача, напір). В інженерній практиці вирішення такого завдання відповідає проектувальному розрахунку, що часто має на меті оптимізацію геометричних параметрів за деяким критерієм оптимальності (найчастіше - коефіцієнту корисної дії).

В даний час при проектуванні проточних частин відцентрових насосів використовуються наступні методи [1]:

- перерахунок з моделі на натурні умови (при наявності модельних проточних частин, що повністю відповідають вимогам технічного завдання);

- перерахунок з моделі на натурні умови з наступним урахуванням немодельних змін (у випадках відхилення модельної проточної

частини від повної геометричної подібності);

- новий розрахунок проточної частини із залученням узагальнених емпіричних даних (у випадках відсутності модельних проточних частин);

- чисельний експеримент із застосуванням як модулів із аналогічних проектів, так і універсальних САЕ-програм.

Багаторічний досвід створення відцентрових насосів показує, що найбільш достовірним методом розрахунку і проектування проточних частин відцентрових насосів залишається метод на основі теорії подібності, який застосовується при наявності модельних проточних частин з необхідним коефіцієнтом швидкохідності. Ця методологія отримала найбільше поширення і не вимагає додаткової експериментальної перевірки.

Досить часто використовуються і методи перерахунку з моделі на натурні умови з наступним урахуванням немодельних змін, так як вони є результатом узагальнення значного емпіричного досвіду і прості в застосуванні (не вимага-

ють значних обчислювальних процедур).

При всій своїй популярності, простоті та достовірності застосування цих двох методів проектування обмежене, оскільки використовувати їх можна тільки при наявності модельних проточних частин, що забезпечити в деяких випадках неможливо.

Значний інтерес викликає можливість створення методик проектування нових проточних частин і перевірка їх достовірності. При створенні нових проточних частин (у разі відсутності модельних проточних частин) широко застосовують теорію решіток, узагальнені емпіричні залежності або методику розрахунку робочого колеса за номірною струменевою теорією Ейлера. Найчастіше в цьому випадку доводиться розглядати кілька можливих варіантів поєднань геометричних параметрів елементів проточної частини (альтернатив), що забезпечують необхідні робочі параметри. Остаточний вибір альтернатив відбувається тільки на стадії експериментального опрацювання насосів, що дозволяє накопичити

основну частину необхідної інформації для прийняття рішення.

Розвиток методів проектування призводить до запровадження автоматизації як рутинних операцій, так і процесу варіантного вибору оптимальної конструкції за допомогою САПР. У роботі [2] запропонована автоматизована методологія проектування відцентрових насосів на основі блочно-модульного підходу до синтезу конструкції. Ця методологія дозволяє порівняти різні варіанти конструктивного виконання, але потребує використання результатів прогнозування характеристик, які можна отримати за допомогою САПР з вбудованими інструментами інженерного аналізу.

Розробники сучасних CAE-модулів стверджують, що вони володіють широкою функціональністю і можуть бути використані для інженерного аналізу [3], в тому числі і насосного обладнання. Результати конструювання, як правило, містять дані, які можна використовувати в якості вихідних даних для інженерного аналізу. На сьогодні явно намітилася тенденція доповнення CAD-інструментів CAE-інструментами [4], що робить їх дуже зручними для інтеграції в загальну автоматизовану систему проектування. При цьому залишається відкритим питання їх достовірності.

Все вище зазначене дозволяє зробити висновок, що в теперішній час є актуальною проблема створення засобів автоматизованого проектування відцентрових насосів шляхом інтеграції методів проектування нових проточних частин і CAD, CAE - інструментів в єдину систему проектування. В даному контексті методи проектування проточних частин можна розглядати як методологію нульового рівня (проектувальні розрахунки), метою яких є накопичення початкового об'єму необхідної інформації, а CAE-інструменти - як методологію першого рівня, мета яких замінити експериментальне відпрацювання насосів і надати основну частину необхідної інформації для прийняття рішення в остаточному виборі альтернатив.

Постановка завдання. Цілями даного дослідження є:

- перевірка достовірності CAE-інструменту COSMOSFloWorks,

вбудованого в САПР SolidWorks шляхом зіставлення результатів розрахунку, виконаного за допомогою даного інструменту з експериментальними характеристиками реального відцентрового насоса;

- перевірка діапазону застосування методик проектування проточних частин відцентрових насосів;

- перевірка можливості інтеграції твердотільної моделі проєктованого об'єкта, методик проектування нових проточних частин і CAE-інструменту COSMOSFloWorks в єдину автоматизовану систему проектування;

- створення рекомендацій щодо спільного використання методик проектування нових проточних частин і CAE-інструменту COSMOSFloWorks.

Зіставлення і перевірка адекватності методик і CAE-інструменту проводилося з експериментальною характеристикою насосу AX 65-40-200K, виготовленого і випробуваного ПАТ «НВО ім. Фрунзе» (м. Суми). Насос AX 65-40-200 K - хімічний, одноступінчатий, горизонтальний, консольний, з відкритим робочим колесом, з осьовим підведенням рідини, призначений для перекачування хімічно активних і нейтральних рідин без включень або тих, що містять тверді включення з об'ємною концентрацією до 1,5%, розміром частинок до 1 мм. Насос створений відповідно до стандарту ISO 2858. Випробування проводилися на спеціалізованому випробувальному стенді

хунку задавалися необхідна витрата, напір і частота обертання насоса. Спочатку здійснювався вибір основних геометричних параметрів елементів проточної частини. При цьому на стадії вибору основних параметрів також попередньо оцінювались значення ККД і напору в розрахунковій точці (точці максимального ККД). Попередню оцінку гідравлічного ККД насоса виконували за формулами, використовуючи метод розрахунково-експериментального поділу втрат [6]. Після визначення основних параметрів насоса (вихідного діаметру, ширини колеса на вході і виході, кутів установки лопаті на вході і виході, числа лопатей і т.д.) в рамках одновимірної теорії проводився поелементний розрахунок втрат у проточній частині. Втрати напору в насосі визначалися як сума втрат в окремих елементах (колесі, спіралі і дифузори спірального відводу). На основі цих розрахунків уточнювалися параметри насоса. Результати розрахунку порівнювалися з робочою характеристикою насоса, отриманої в результаті проведення випробувань (табл. 1).

Аналіз результатів розрахунку показав, що похибка розрахунків становить 0,8%.

На другому етапі здійснювалося прогнозування робочої характеристики насоса. В основу аналітичного розрахунку характеристики насоса $H=f(Q)$ покладено методику, яка наведена в роботах [1, 8].

Таблиця 1. Результати прогнозування напірної характеристики за методикою [1, 8]

Витрати, м ³ /год	Напір, м водяного стовпа		Відхилення, %
	Експеримент	Прогноз	
25	49	48,6	0,8%

для відцентрових насосів типу X (AX) 1.6010-78, який проходить щорічну атестацію в Державному центрі стандартизації, метрології та сертифікації м. Суми.

Результати. Дослідження мало кілька етапів.

На першому етапі реалізовувався розрахунок основних елементів проточної частини, спираючись на методику, наведену в роботі [5].

Вихідними даними для розра-

хунку визначався коефіцієнт напору за залежністю:

$$\psi = (0,025\beta_2 - 0,6)q_2\delta_m^{2+} + (10,6 - 0,23\beta_2)q^2\delta_m + (2,03\beta_2 - 189)q^2 + (0,001\beta_2 - 0,105)\delta_m + (0,002\beta_2 + 1,18), \quad (1)$$

де $q = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 u_2}$ - коефіцієнт пода-

чі; $\psi = \frac{2gH}{u^2}$ коефіцієнт напору;

Таблиця 2. Результати прогнозування напірної характеристики за методикою [1, 8]

Витрати, м ³ /год	Напір, м водяного стовпа		Відхилення, %
	Експеримент	Прогноз	
5	56,40	52,888	6,23%
10	55,8	52,448	6,01%
15	54,00	51,715	4,23%
20	52,10	50,688	2,71%
25	49	49,369	0,75%

β_2 – кут установки лопаті на виході з робочого колеса; δ_m – відносний торцевий зазор між кінцями лопатей колеса і корпусом насоса; D_2 – зовнішній діаметр робочого колеса насоса; b_2 – ширина робочого колеса на виході; u_2 – переносна швидкість на виході з робочого колеса.

В даному розрахунку геометричні параметри δ_m , β_2 , D_2 , b_2 , u_2 приймали фіксоване значення, отримане в результаті розрахунку за методикою [5]. Значення Q задавалися відповідно до експериментальної характеристики насоса. За отриманими значеннями коефіцієнта напору визначався напір, і розраховувалося відхилення розрахункових даних від експерименту.

Аналіз отриманих результатів показав, що середнє відхилення розрахунків становить порядку 3,986%, а це знаходиться в межах інженерної точності.

На наступному етапі проводилось моделювання течії рідини в насосі засобами COSMOSFloWorks.

Для цього попередньо засобами SolidWorks була побудована параметризована твердотільна геометрична модель відцентрового насоса, яка передається в програму COSMOSFloWorks для проведення обчислювального експерименту.

У якості вихідних даних для проведення моделювання течії рідини в насосі (рис. 1) використовувалися значення тиску рідини на вході і об'ємної витрати рідини на виході з насоса, а також температура рідини, кутова швидкість обертання робочого колеса (ω). У процесі моделювання задавалися значення витрат, що відповідають значенням натурального експерименту. Для додаткового контролю якості розрахунку з'являлося обчислене значення витрати робочої

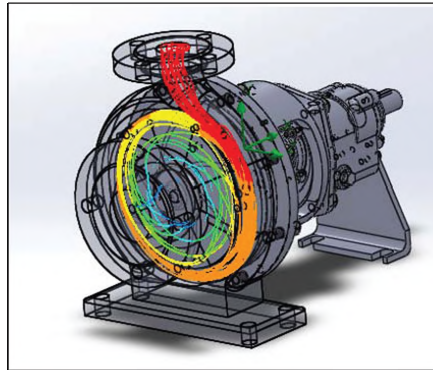


Рис. 1. Візуалізація ліній струму, пофарбованих за значеннями тиску

рідини на вході в насос з заданою витратою на виході.

Процес розрахунку параметрів течії в насосі ітераційний, тому в ході дослідження потрібно було визначити критерії, за збіжністю яких можна вважати адекватними отримані результати. Основною експлуатаційною характеристикою насоса є напір, а значить параметри, за якими він визначається мають бути віднесені до основних критеріїв збіжності результатів. Тому першими двома критеріями збіжності було обрано повний тиск робочої рідини у вхідному та вихідному перерізах насоса.

Також треба відмітити, що робочий процес насоса призводить до появи на вході насоса вихору. Адекватні результати розрахунку характеристик насоса можна очікувати лише тоді, коли цей вихор остаточно сформувався, тобто досяг усталеного стану. Тому додатковим критерієм збіжності розрахунку було обрано витрату рідини на вході в насос.

Як показали дослідження розробленої моделі, при збіжності усіх трьох виділених критеріїв $H=f(Q)$ – характеристика насоса, що розрахована за результатами розрахункового експерименту, збігається з реальною $H=f(Q)$ – характеристикою з достатньою точністю. Але збіжність усіх трьох виділених критеріїв досягається не одноразово. Тому питання, результати якого циклу збіжності критеріїв треба обирати для остаточного визначення характеристик насоса, залишається відкритим.

У результаті розрахункових експериментів були отримані значення тиску рідини на виході з насоса, за якими були розраховані значення напорів, що створюються насосом. Результати зіставлення розрахункових значень і значень, отриманих у ході натурального експерименту, представлені в табл. 3.

Зіставлення результатів моделювання засобами COSMOSFloWorks з експериментальними результатами показало, що створена модель має достатню точність.

На рис. 2 представлено зіставлення експериментальних даних з результатами аналітичного розра-

Таблиця 3. Результати розрахунку напірної характеристики, що був проведений в COSMOSFloWorks

Витрати, м ³ /год	Напір, м водяного стовпа		Відхилення, %
	Експеримент	Модел ь COSMOSFloWorks	
5	56,40	43,1	23,58%
10	55,8	51,18	8,28%
15	54,00	51,06	5,44%
20	52,10	49,82	4,38%
25	49	47,57	2,92%

хунку і розрахунку за запропонованою моделлю.

З графіка видно, що в області менше оптимального режиму результати, отримані за допомогою COSMOSFloWorks, мають велику похибку, ніж на оптимальному режимі, однак на режимах більше оптимального результати моделювання в COSMOSFloWorks ближче до результатів експерименту.

Також можна відзначити, що нахил кривої $H=f(Q)$, отриманої в результаті виконання чисельного експерименту в COSMOSFloWorks, більш збігається з нахилом кривої $H=f(Q)$, отриманої шляхом проведення натурного експерименту.

Серед розглянутих методів найменшу похибку дає методика, наведена в роботі [5]. Тому процес проектування нової проточної частини відцентрового насосу пропонуємо проводити наступним чином.

Спочатку по заданим проектним значенням напору та витрат визначати за методикою [5] геометричні параметри елементів проточної частини. Потім передавати отриманні значення геометричних параметрів для побудови геометричної твердотільної моделі у програмний продукт SolidWorks. Після побудови геометричної моделі проводити чисельний експеримент за допомогою COSMOSFloWorks для отримання кривої $H=f(Q)$.

Для отримання оптимальних значень геометричних параметрів проточної частини необхідно рекурсивно проводити розрахунок у COSMOSFloWorks. Після кожного розрахунку необхідно змінювати значення геометричних параметрів проточної частини у відповідності до найкращого з отриманих варіантів і проводити розрахунок знову. Такі дії повинні повторюватися до тих пір, поки крива $H=f(Q)$ не буде проходити через точку, отриману у результаті розрахунків за методикою [5].

Висновки

Отримана в результаті попередніх розрахунків геометрична модель є основою для чисельного моделювання в COSMOSFloWorks процесу роботи насоса, за резуль-

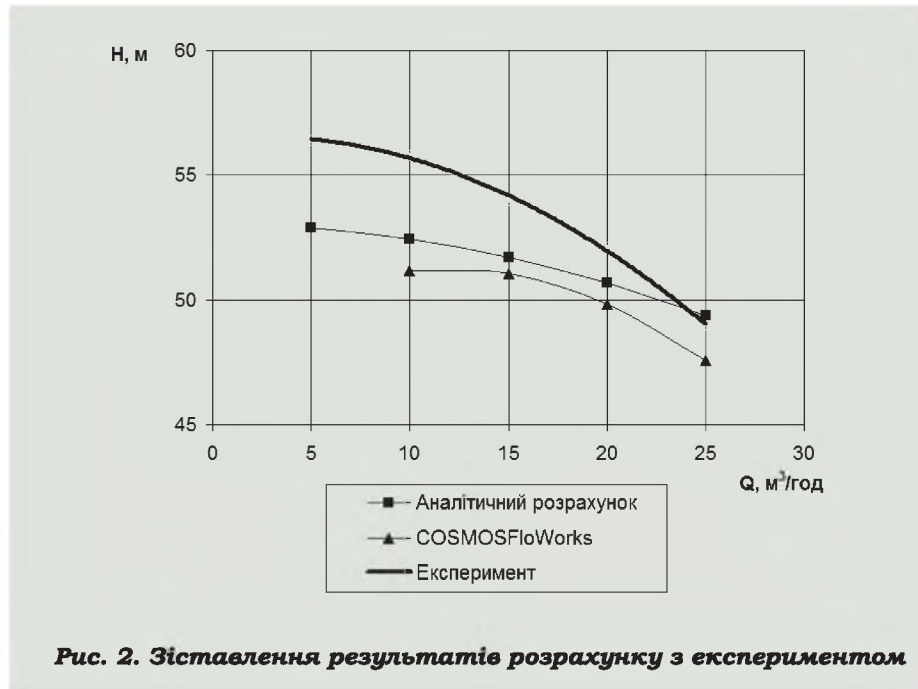


Рис. 2. Зіставлення результатів розрахунку з експериментом

татами якого можна з достатньою точністю спрогнозувати напірну характеристику розрахованої конструкції. Проведення чисельного експерименту в COSMOSFloWorks дозволяє отримати результати, що збігаються з реальними експериментальними даними. Це дозволить використовувати даний інструмент для вивчення подібних насосів, щоб оцінити реальні експлуатаційні характеристики проектного зразка на стадії проектування.

Така методика дозволить отримувати найбільш оптимальні геометричні параметри проточної частини насоса при заданих вхідних умовах, скоротити витрати часу і матеріальних ресурсів на проектування та експериментальну доводку.

Запропоновану математичну модель можна також використати як інструмент для вирішення часткових проектних завдань методології проектування відцентрових насосів [2].

Список літератури

1. Ржебаева Н.К. Р48 Расчет и конструирование центробежных насосов: Н.К.Ржебаева, Э.Е. Ржебаев. Учебное пособие. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 220 с.
2. Неня В.Г. Методология проектирования відцентрових насосів // В.Г.Неня, Н.О.Зінченко / Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2011. – №2 (24).

– С. 14-17.

3. Алямовский А.А. «Solid Works компьютерное моделирование в инженерной практике».

4. Павлов С. К вопросу о классификации МСАЕ-систем. С. Павлов, Ю.Береза / Часть III.// CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 4 (48). – С.64-75.

5. Ржебаева Н.К. Методика расчета насосов с полуоткрытыми и открытыми рабочими колесами / Н.К.Ржебаева, В.В.Шендрик, М.В.Бородай // Вестник НТУУ «КПИ»: Машиностроение. – К.: 2002. Вып. 42, т. 2 – С. 166–170.

6. Ржебаева Н.К. Баланс энергии на оптимальном режиме и расчет гидравлических потерь в проточной части с полуоткрытыми и открытыми рабочими колесами / Н.К.Ржебаева, В.В.Седая // Вестник НТУУ «КПИ»: Машиностроение: Вып.35.– К.:1999.– С.205 - 210.

7. Ржебаева Н.К., Бородай М.В. Баланс энергии в насосах с полуоткрытыми и открытыми рабочими колесами на режимах меньших оптимального / Н.К.Ржебаева, М.В.Бородай // Вестник НТУУ «КПИ»: Технологии в машиностроении. – Х.: 2001. Вып. 129, ч. 2 - С. 372 - 380.

8. Агаджанова С.В. Исследование и разработка методики расчета энергетических характеристик полуоткрытых рабочих колес центробежных насосов.- Дисс. канд техн. наук. –Сумы, 1995.– 140 с.