

*Н. Г. ШЕВЧЕНКО, Д. В. ЛЕБЕДИНЕЦЬ***МОДИФІКАЦІЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ЗА ДОПОМОГОЮ САПР**

В даний час під час проектування гідравлічних машин широко використовується спеціалізоване програмне забезпечення. У роботі представлено огляд сучасних програм, що використовують систему автоматизованого проектування відцентрових насосів. Сучасний підхід до проектування відцентрових насосів ґрунтується на спільному вирішенні прямої та зворотної задач теорії робочого процесу в гідромашинах. Метою роботи є розробка робочого колеса відцентрового секційного насоса на такі параметри: об'єм рідини 6 м^3 на годину та напір 140 м. Насос використовується для подачі нафтової сировини до рекуператорів малої дистиляційної установки МДУ-20 нафтопереробного заводу. У секційному насосі є можливість компоувати пакети робочих коліс різного виконання. Відсутність у відкритому доступі геометричних розмірів робочого колеса відцентрового секційного насоса на потрібні параметри ускладнює вибір ефективного режиму роботи. Тому задача проектування та дослідження робочих коліс насоса типу ВНС за допомогою САПР у програмному середовищі ANSYS CFD є актуальною. У роботі використовується вільна академічна версія ANSYS CFD. У роботі представлено опис основних етапів проектування та дослідження відцентрового насоса. За струмінною класичною теорією та результатами розрахунку в програмі Vista CPD були проаналізовані та обрані геометричні розміри та кінематичні параметри насоса. Загальний ККД насоса на попередньому етапі проектування сягає 50 %. На другому етапі вирішується пряма задача комп'ютерного 3D моделювання у програмному середовищі Ansys CFX – визначення гідродинамічних та енергетичних характеристик насоса. У роботі представлено результати чисельного дослідження трьох варіантів робочого колеса насоса, які використовуються для прогнозування режиму ефективної роботи відцентрового насоса.

Ключові слова: нафтова сировина, відцентровий насос, робоче колесо, чисельне моделювання, система автоматичного проектування, CFD, Vista CPD, коефіцієнт корисної дії, k-ε модель турбулентності.

*N. SHEVCHENKO, D. LEBEDYNETS***MODIFICATION OF THE CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER USING CAD**

Currently, during the design of hydraulic machines, specialized software is widely used. The work presents an overview of modern programs that use a system of automated design of centrifugal pumps. The modern approach to the design of centrifugal pumps is based on the joint solution of direct and inverse problems of the theory of the working process in hydraulic machines. The purpose of the work is to develop the impeller of a centrifugal sectional pump with the following parameters: a liquid volume of 6 m^3 per hour and a pressure of 140 m. The pump is used to supply crude oil to the recuperators of the small distillation unit SDU-20 of the oil refinery. In the sectional pump, it is possible to compose packages of impellers of various designs. The lack of publicly available geometric dimensions of the impeller of a centrifugal sectional pump for the required parameters makes it difficult to choose an effective mode of operation. Therefore, the task of designing and researching the impellers of the VNS type pump using CAD in the ANSYS CFD software environment is relevant. The work uses the free academic version of ANSYS CFD. The work presents a description of the main stages of design and research of a centrifugal pump. The geometric dimensions and kinematic parameters of the pump were analyzed and selected according to the jet classical theory and calculation results in the Vista CPD program. The overall efficiency of the pump at the preliminary design stage reaches 50 %. At the second stage, the direct task of computer 3D modeling in the Ansys CFX software environment is solved. Determination of the hydrodynamic and energy characteristics of the pump is carried out. The paper presents the results of a numerical study of three variants of the pump impeller, which are used to predict the mode of efficient operation of a centrifugal pump.

Keywords: crude oil, centrifugal pump, impeller, numerical simulation, automatic design system, CFD, Vista CPD, efficiency, k-ε turbulence model.

Вступ. Сучасний підхід до проектування проточних частин гідромашин ґрунтується на спільному вирішенні прямих і зворотних задач теорії робочого процесу. У монографії [1] викладено основні методи дослідження робочого процесу лопатевих гідромашин на основі різних підходів до моделювання технічних об'єктів. Розглянуто питання проектування гідромашин, а також шляхи їх вирішення за допомогою сучасних пакетів прикладних програм.

На сьогодні при проектуванні гідравлічних машин широко використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Застосування числових методів проектування дає можливість значно зменшити час розробки і покращити якість проектування проточних частин насосів. У роботі [2] надано приклади та аналіз сучасних програмних комплексів, які використовуються для розрахунку просторової течії в проточних частинах гідромашин.

Українськими науковцями Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного розроблено програмний комплекс моделювання IPMFlow. Результати досліджень просторової течії рідини в

проточних частинах гідромашин наведено у роботах [3, 4]. У роботі [4] проаналізовано сучасний підхід до оптимізації характеристик гідромашин та визначення цільових параметрів оптимізації.

Слід відзначити, що попереднє проектування є важливим першим кроком у проектуванні будь-якої гідромашини. Використання попереднього 1D та 2D проектування насоса та подальше використання потужнішого комп'ютерного моделювання в системі CFD ефективно доповнюють один одного в процесі проектування гідромашин.

Так, наприклад, у середовищі програмного забезпечення AxSTREAM® в рамках дослідницької роботи можна виконувати чисельні зворотну та пряму задачі. У роботі [5] надано приклад використання програмного AxSTREAM® у навчальному процесі кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури» НТУ «ХПІ». А саме, проектування проточної частини відцентрового насоса та профілювання лопатей на задані умови; обчислення гідродинамічних параметрів спроектованого насоса у режимі Meanline mode та енергетичних характеристик насоса.

Однією з передових і найпопулярніших у спеціалістів в сфері автоматизованих інженерних розрахунків є універсальна програмна система ANSYS. Згідно [6–8] у середовищі *Ansys Workbench* існує пакет програмних додатків і функцій для проектування гідромашин, який дозволяє оптимально розробити геометрію відцентрового насоса і провести аналіз поведінки потоку в насосі. Програмний модуль *Ansys Vista CPD* (*Centrifugal Pumps Design*) використовується для експрес-аналізу характеристик течії в проточній частині відцентрового насоса шляхом розв'язання в меридіональній площині двовимірних рівнянь Ейлера, середніх в окружному напрямку. *Ansys VistaCPD* – це 2D-рішальник, що є перехідною ланкою між початковим 1D-проекуванням по середній лінії та 3D CFD-аналізом.

Розрахунок в *Ansys Vista CPD* дозволяє в стислий термін розглянути безліч варіантів конструкції та внести необхідні корективи в геометричну модель на початкових етапах проектування.

Передача 3D-геометрії виконується через *Ansys BladeModeler*. Побудова розрахункової моделі виконується в програмному середовищі *Ansys CFX-Pre*. Надалі система дозволяє автоматичне створення звіту та візуалізацію результатів розрахунку за допомогою *Ansys CFD-Post*.

Задачі досліджень з використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання є актуальними. Особливістю роботи є використання вільного програмного забезпечення – *ANSYS Student*.

Метою роботи є розробка робочого колеса відцентрового насоса ВНС 6/140 за допомогою систем автоматизованого проектування у програмному середовищі ANSYS CFD. Насоси цього типу – відцентрові, горизонтальні, секційні, однокорпусні, багатоступінчасті, з одностороннім розташуванням робочих коліс, з автоматичним розвантаженням осьового зусилля ротора, гідравлічною п'ятою, з підшипниками ковзання, з приводом від електродвигуна. За посиланнями [9, 10] проведено огляд енергетичних характеристик та конструкцій багатоступеневого відцентрового насоса для заданих параметрів подачі 4–3 м³/год для створення напору 140–180 м. Насос ВНС 6/140 використовується для подачі нафтової сировини в рекуператори малої дистиляційної установки МДУ-20 мінінафтопереробного заводу. Наявність у відкритому доступі тільки габаритних параметрів насосів типу ВНС на потрібні параметри ускладнює розробку робочих коліс, тому було прийнято рішення провести розробку насоса за наступним алгоритмом:

1. Провести попередній проектувальний розрахунок меридіанного перерізу відцентрового насоса за класичною методикою А. А. Ломакіна.

2. За отриманими даними провести наближений розрахунок геометричних характеристик відцентрового насоса у додатку *VistaCPD*.

3. Провести чисельне моделювання гідродинамічних параметрів декілька варіантів робочого колеса (РК).

У роботі [11] проведено чисельні дослідження

відцентрового насоса (розрахункові параметри: об'єм 100 м³/год, напір 18 м, швидкість обертання 1480 хв⁻¹). Після огляду поля течії в моделі насоса проведено деякі геометричні модифікації, такі як діаметри робочого колеса на вході та виході, кути входу та виходу лопаті, кут огинання лопаті, товщина лопаті, ширина входу та виходу лопаті. Експериментальні дослідження були реалізовані для нового насоса.

У роботі [12] було проведено чисельне дослідження відцентрового насоса на параметри: витрата рідини 120 м³/год та напір 20 м. У роботі розроблено та оптимізовано проточна частина відцентрового насоса за допомогою 4-х модулів програмного забезпечення: *ANSYS Vista*, *ANSYS DesignModeler*, програмне забезпечення для оптимізації поверхні відлика і *ANSYS CFD*.

У роботі [13] надано приклад проектування та дослідження відцентрового компресора за допомогою системи автоматизованого проектування *Ansys VistaCCD*.

Опис основних етапів проектування та дослідження відцентрового насоса. Основні етапи САПР відцентрового насоса зображено на рис. 1.

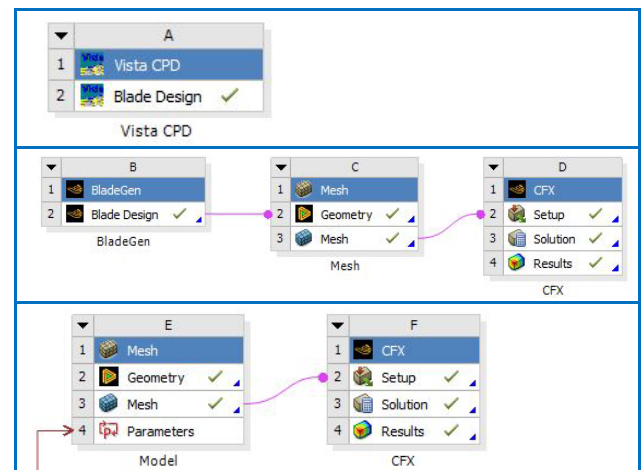


Рис. 1. Схема блоків CFD «ANSYS» для САПР відцентрового насоса

Блок А – попереднє проектування РК та спіральної камери насоса на задані параметри.

Блок В – можливість редагування геометричних параметрів лопаті та меридіональної проекції, числа лопатей та інші.

Блок С – автоматизований процес передачі геометрії твердотільної моделі РК та побудова розрахункової сітки.

Блок Д – побудова математичної моделі, чисельне рішення та візуалізація та оформлення результату гідродинамічних розрахунків.

Блок Е – автоматизований процес передачі геометрії твердотільної моделі спіральної камери та побудова розрахункової сітки.

Блок F – побудова математичної моделі, чисельне рішення та візуалізація та оформлення результату гідродинамічних розрахунків у спіральної камери насоса.

Результати проектування відводу ВНС у роботі

не надано.

Визначення основних параметрів насоса у додатку Vista CPD. Основні вихідні параметри насоса задаються у блоку А, додатка Vista CPD. Це: швидкість обертання РК 3000 хв^{-1} ; витрата $6 \text{ м}^3/\text{год}$; потрібний напір насоса – 140 м. Максимальне число ступенів – 8. Швидкохідність насоса $n_s = 50 \text{ хв}^{-1}$. У секційному насосі ВНС використовують кілька модифікацій РК закритого типу.

Робоче колесо характеризується такими геометричними параметрами: діаметром входу D_0 потоку рідини в колесо, діаметрами входу D_1 і виходу D_2 з лопатки, діаметрами валу d_v і ступиці $d_{ст}$, довжиною ступиці $l_{ст}$, шириною лопатки на вході b_1 і виході b_2 . За умовами виконання міцності обрано діаметр валу багатоступеневого насоса – 25 мм. Прийнято умови осьового входу у перший ступень насоса. У роботі за струменевою класичною теорією [13] та результатами програмного середовища Vista CPD проаналізовано та обрано геометричні, кінематичні параметри насоса. Побудова меридіонального проєкції колеса проводиться виходячи з досвіду, накопиченого при обробці та доведенні насосів. Загальний ККД насоса приблизно досягає 60 %.

На рис. 2 та 3 надано приклад чисельних результатів та ескиз РК відцентрового насоса. Є можливість розрахунків 2D-геометрії відводу спірального.

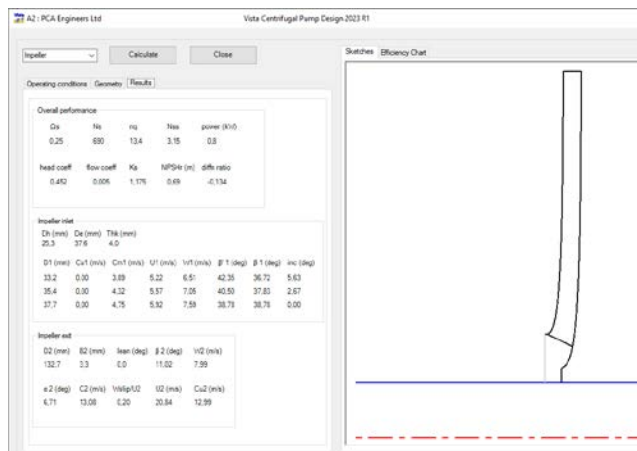


Рис. 2. Додаток Vista CPD – до побудови геометрії РК

Побудова геометрії тривимірної моделі рідини та сіткової моделі. У додатку «Vista CPD» є можливість створення, редагування та імпортування тривимірної розрахункової моделі рідини. У роботі проведено дослідження декілька модифікацій робочого колеса: зміна кількості лопатей, розподіл товщини лопаті, кутів на кромках. У процесі проектування є можливість слідкувати за розподілом кутів вздовж лінії струму, та інші. На рис. 3 надано інтерфейси модулів BladeGen, DesingModeler додатка «Vista CPD».

Математична модель та граничні умови. Для математичного моделювання (ММ) турбулентної течії у проточній частині ЕВН використовуємо систему рівнянь нерозривності, рівняння Нав'є-Стокса

осереднені за Рейнольдсом та систему рівнянь для k-ε моделі турбулентності [1, 3].

Для чисельної реалізації ММ у задачах гідродинаміки необхідно створити сіткову модель та подрібнити сітку поблизу твердих стінок, внаслідок наявності прикордонних шарів й особливостей гідродинаміки в них. Велике значення на збіжність і якість розрахунку мають розміри сітки та призматичних шарів в зоні приграничного шару поблизу стінок.

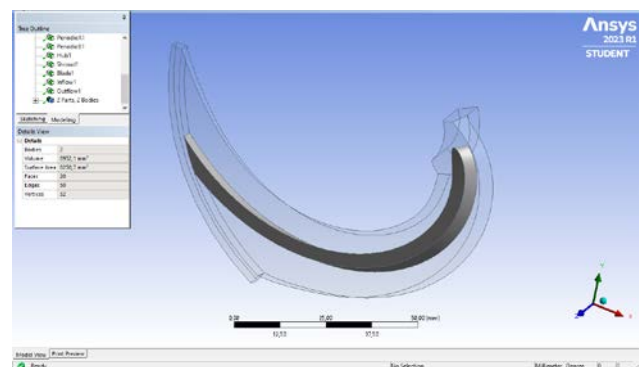
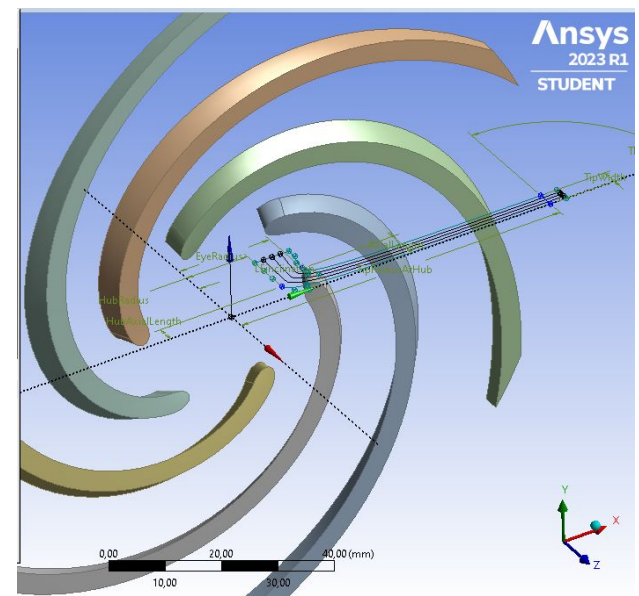
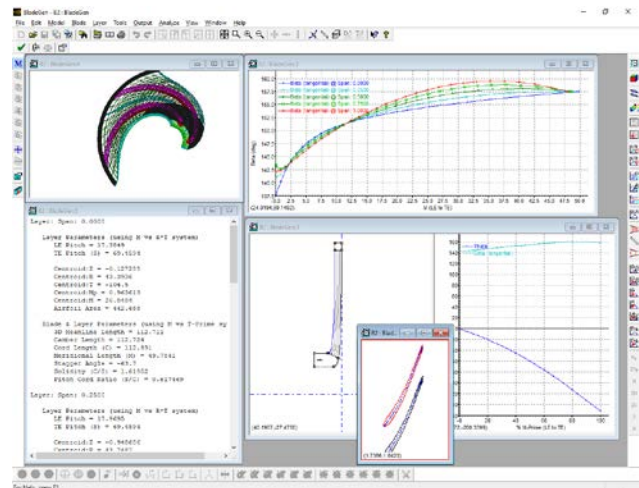


Рис. 3. Інтерфейси модулів BladeGen, DesingModeler та імпортування 1/6 частини тривимірної розрахункової моделі РК

У роботі використовується студентська версія програми ANSYS з обмеженнями в кількості осередків сітки – 500 тис.

Після роботи у редакторі Mesh (Блок D) переходимо до наступного етапу CFX Pre – Блок F. Після запуску Setup із всіх тривимірних об'єктів сітки автоматично створюється домен за назвою Default Domain. Із всіх двовимірних областей для кожного домену автоматично створюються границі під назву Default Domain Default.

Задаємо ММ та граничні умови для розрахункових зон, див. рис. 4. Для побудови моделі течії у робочому колесі, по-перше, обирається тип машини «Pump» (насос). Далі вказується тип розрахункових областей. Для робочого колеса – «Rotating», $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$; для спірального відводу – «Stationary». Тип робочого середовища – «Water»; модель турбулентності – стандартна k-ε.

В якості граничної умови на вході в розрахунковий канал задавався масова витрата в кг/с. Розрахунок проводився для робочого діапазону роботи насоса: $0,75Q_{\text{опт}} < Q_{\text{опт}} < 1,25Q_{\text{опт}}$. Задано наступні граничні умови:

- на поверхні лопаті Blade 1 задавалася швидкість обертання РК, що дорівнює швидкості обертання валу 3000 хв^{-1} ;
- на нерухомих поверхнях РК (Blade, Hub, Shroud) задається умова «No Slip Wall» – швидкість дорівнює нулю;
- на вході у канал робочого колеса «Inlet» – задається масова витрата на один сектор РК (число лопатей $z = 6$). Наприклад, $G = 0,25 \text{ кг/с}$, що дорівнює режиму насоса $Q = 5,4 \text{ м}^3/\text{год}$;
- на виході розрахункового каналу «Outlet» – надлишковий тиск – 0;
- на періодичних поверхнях «Periodic 1 Side» та «Periodic 1 Side 2» – умови періодичності.

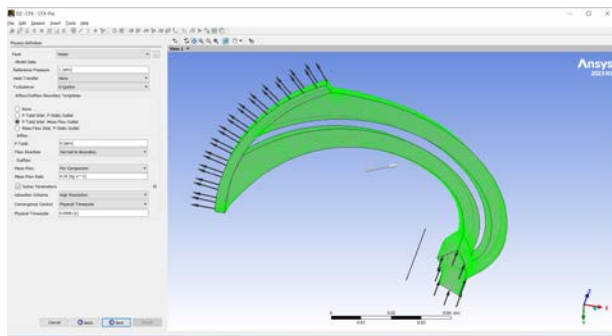


Рис. 4. До завдання граничних умови у розрахунковій зоні РК насоса

Результати дослідження. У роботі досліджено три варіанти робочого колеса насоса:

- V-0** – базовий – $D_2 = 0,132 \text{ м}$;
- V-1** – підрізка колеса $D_2 = 0,12 \text{ м}$, коса кромка;
- V-2** – підрізка колеса та зміна розташування вхідної кромки РК.

Базовий варіант. На рис. 5 наведено розрахункові характеристики РК відцентрового насоса для базового варіанту V-0.

Далі надано порівняльні візуальні результати

чисельних розрахунків для базової моделі РК: розподіл швидкості C_m (рис. 6) та розподіл тиску вздовж лопаті – рис. 7 для 2-х режимів роботи насоса: $Q = 1,5 \text{ л/с}$ та $Q = 2,1 \text{ л/с}$.

Режим $Q = 1,5 \text{ л/с} = 5,4 \text{ м}^3/\text{год}$ – відповідає оптимальної зоні робочих характеристик дослідженого багатоступеневого насоса НВС 6-140.

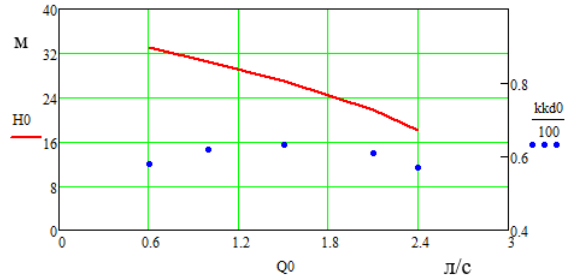


Рис. 5. Розрахункові характеристики РК. Базовий варіант V-0: -- $H = f(Q)$; °° – $\text{ККД} = f(Q)$

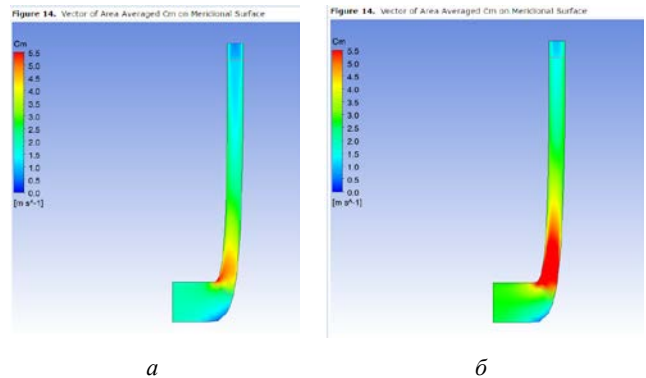


Рис. 6. Візуалізація течії у меридіональному перетині каналу РК (базовий варіант V-0) для двох режимів: а – $Q = 1,5 \text{ л/с}$; б – $Q = 2,1 \text{ л/с}$

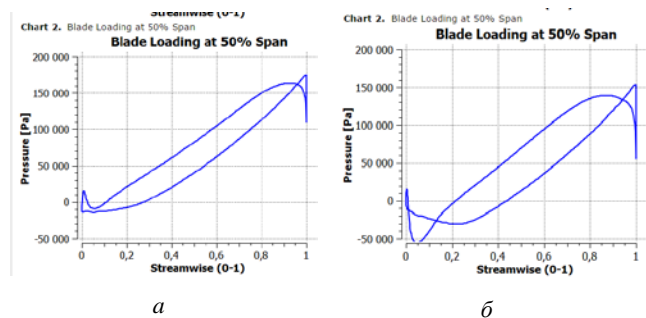


Рис. 7. Чисельні результати розподілу тиску вздовж лопаті (базовий варіант V-0) для двох режимів: а – $Q = 1,5 \text{ л/с}$; б – $Q = 2,1 \text{ л/с}$

Далі проведено модифікацію РК.

Варіант V-1. Проведено модифікацію базового варіанту V-0 – підрізування робочого колеса РК:

- підрізка робочого колеса РК $D_2 = 120 \text{ мм}$;
- зміна товщини лопаті.

На рис. 8 надано геометричні параметри варіанту V-1 у середовищі.

Варіант V-2. На рис. 9 представлено варіант V-2 – зміна кромки РК.

В табл. 1 надано чисельні результати основних параметрів насоса – напір та ККД. Розрахунки

проведено для двох режимів – $Q = 1,5$ та $Q = 2,1$ л/с та для 2-х варіантів товщини лопаті (4 мм та 2 мм).

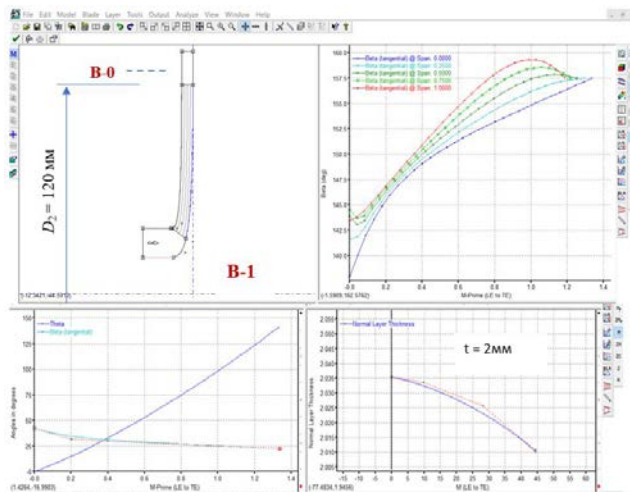


Рис. 8. Базовий варіант B-0 та його модифікація B-1

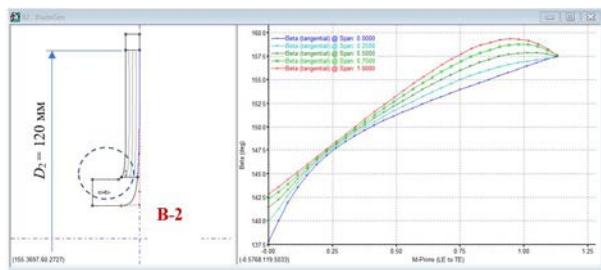


Рис. 9. Модифікація базового варіанту РК: B-2

Таблиця 1 – Зведені результати розрахунків модифікованих РК

| Варіант | B-0 | B-1 | | B-2 | |
|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| t , мм | 4 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| H , м | 26/18 | 21,1/16,7 | 21,8/17,9 | 24,5/21,8 | 24,6/22,1 |
| ККД, % | 62/61 | 61,7/60,2 | 62,8/61,9 | 64,1/65 | 64,2/65,2 |
| Q , л/с | 1,5/2,1 | 1,5/2,1 | 1,5/2,1 | 1,5/2,1 | 1,5/2,1 |

На рис. 10 представлено візуалізація результатів розрахунку РК для варіанту B-2 (прийнято: товщина лопаті на виході $t = 2$ мм; оптимальний режим $Q = 1,5$ л/с).

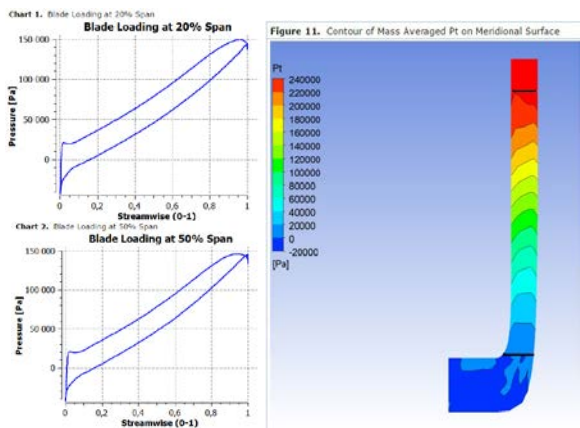


Рис. 10. Розподіл тиску вздовж профіля та у меридіональному перетині РК для варіанту B-2

Висновки. Дослідження проведено на основі проектування проточної частини робочого колеса відцентрового насоса за допомогою системи автоматизованого проектування Ansys Vista CPD.

За струминною класичною теорією та результатами розрахунку в програмі Vista CPD були проаналізовані та обрані геометричні розміри та кінематичні параметри насоса. Загальний ККД насоса на попередньому етапі проектування сягає 50 %.

Гідравлічний ККД модифікованого робочого колеса насоса (варіант B-2) після другого етапу проектування збільшився на 2 %, відбулося невеличке зміщення характеристики у зону більших витрат.

Використання чисельних досліджень за допомогою програмних додатків Ansys дає можливість допрацювати геометрію насоса і покращити його первісні характеристики.

Список літератури

1. Дранковський В. Е., Миронов К. А., Тиньянова І. І., Рєзва К. С., Крупа Є. С., Кухтенков Ю. М. *Математичне моделювання робочого процесу гідромашин: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 406 с. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/56895/1/Monograph_2022_Drankovskyi_Matematychne_mod_eliuvannya.pdf (дата звернення: 26.07.2023).
2. Krupa Y., Demchuk R., Volobuiev A., Kis S. Comparative analysis of software systems for hydraulic turbine flow simulation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 49–55. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.08
3. Русанов А. В., Гнесін В. І., Хорев О. М., Жандковскі Р., Колодяжна Л. В., Косьянова А. І., Косьянов Д. Ю., Пашенко Н. В., Русанов Р. А., Сухорєбрий П. М., Чугай М. О. *Науково-технічні основи моделювання і проектування проточних частин енергетичних турбоустановок* / ред. Русанов А. В. Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного, 2019. 384 с.
4. Русанов А. В., Суботін В. Г., Хорев О. М., Биков Ю. А., Коротаєв П. О., Агібалов Є. С. Влиян просторової форми лопатей робочих коліс насос-турбіни на характеристики потоку в турбінному режимі. *Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 25, no. 4. URL: https://journal-me.com/wp-content/uploads/2023/01/2022_4_1_ukr.pdf (дата звернення: 26.07.2023).
5. Шевченко Н. Г., Іващенко В. Ю., Рублевський С. Ю., Загора О. О. Проектування відцентрового насоса за допомогою програмного забезпечення AxSTREAM®. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 72–77. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.11
6. VistaTM CPD – centrifugal and mixed-flow pump preliminary design. URL: https://www.pcaeng.co.uk/content/uploads/Factsheet_No.6_vista_cpd_highres.pdf (дата звернення: 28.07.2023).
7. Ansys Student – Free Software Download. URL: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> (дата звернення: 28.07.2023).
8. ANSYS CFX Tutorials 2021. URL: <https://studylib.net/doc/25536336/ansys-cfx-tutorials-2021-r1> (дата звернення: 30.05.2023).
9. *Насоси. Промислова група Gidromash*. URL: https://gidromash.ua/ru/prom/mnogostupenchatie_gorizontalnie_nasosi/cnsg_1cnsg_acnsg/mnogostup_cnsg_1cnsg_acnsg.html (дата звернення: 26.07.2023).
10. СЛЕМЗ. *Каталог*. URL: <https://konsolnik.com.ua/nasosy-sektsionnyie-tsns-tsns/> (дата звернення: 27.07.2023).
11. Kocaaslan O., Ozgoren M., Aksoy M. H., Babayigit O. Experimental and Numerical Investigation of Coating Effect on Pump Impeller and Volute. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 9, no. 5. P. 2475–2487. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25094
12. Alawadhi K., Alzuwayer B., Mohammad T. A., Buhemdi M. H.

- Design and Optimization of A Centrifugal Pump for Slurry Transport Using Response Surface Method. *Machines*. 2021. Vol. 9, no. 60. doi: 10.3390/machines9030060
- Роговий А. С., Азаров А. С., Демчук Р. М. Удосконалення характеристик робочого колеса високонапірного відцентрового компресора проектуванням за допомогою САПР. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
 - Ржебасва Н. К., Ржебасв Е. Є. *Розрахунок і конструювання відцентрових насосів*. Суми: СумДУ, 2009. 220 с.
- References (transliterated)**
- Drankov'skyi V. E., Myronov K. A., Tyn'yanova I. I., Ryezva K. S., Krupa Ye. S., Kukhtenkov Yu. M. Matematychnе modelyuvannya robochoho protsesu hidromashyn: monohrafiya [Mathematical modelling of the hydraulic machine workflow]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022. 406 p. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/56895/1/Monograph_2022_Drankovskiy_Matematychnе_modeliuvannya.pdf (accessed 26.07.2023).
 - Krupa Y., Demchuk R., Volobuiev A., Kis S. Comparative analysis of software systems for hydraulic turbine flow simulation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 49–55. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.08
 - Rusanov A. V., Hnesin V. I., Khoryev O. M., Zhandkovski R., Kolodyazhna L. V., Kos'yanova A. I., Kos'yanov D. Yu., Pashchenko N. V., Rusanov R. A., Sukhorebryy P. M., Chuhay M. O. *Naukovo-tehnichni osnovy modelyuvannya i proektuvannya protochnykh chastyn enerhetychnykh turboustanovok* [Scientific and technical basis of modeling and design of flow parts of power turbine installations]. Kharkiv, Instytut problem mashynobuduvannya im. A. M. Pidhornoho Publ., 2019. 384 p.
 - Rusanov A. V., Subotin V. H., Khoryev O. M., Bykov Yu. A., Korotayev P. O., Ahibalov Ye. S. Vlyv prostorovoyi formy lopatey robochykh kolis nasos-turbiny na kharakterystyky potoku v turbinnomu rezhymi [Effect of spatial shape of pump-turbine impeller blades on flow characteristics in turbine mode]. *Journal of Mechanical Engineering*. 2022, vol. 25, no. 4. Available at: https://journal-me.com/wp-content/uploads/2023/01/2022_4_1_ukr.pdf (accessed 26.07.2023).
 - Shevchenko N. H., Ivashchenko V. Yu., Rublevs'kyi Ye. Yu., Zakora O. O. Proektuvannya vidtsentrovoho nasosa za dopomohoyu proqramnoho zabezpechennya AxSTREAM® [Centrifugal pump design using AxSTREAM® software]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 72–77. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.11
 - Vista™ CPD – centrifugal and mixed-flow pump preliminary design. Available at: https://www.pcaeng.co.uk/content/uploads/Factsheet_No.6_vista_cpd_highres.pdf (accessed 28.07.2023).
 - Ansys Student – Free Software Download. Available at: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> (accessed 28.07.2023).
 - ANSYS CFX Tutorials 2021. Available at: <https://studylib.net/doc/25536336/ansys-cfx-tutorials-2021-r1> (accessed 30.05.2023).
 - Nasosy. Promyslova hrupa Gidromash [Pumps. Industrial group Gidromash]. Available at: https://gidromash.ua/ru/prom/mnogostupenchatie_gorizontalnie_nasosi/cnsg_1cnsg_acnsg/mnogostup_cnsg_1cnsg_acnsg.html (accessed 26.07.2023).
 - SLEMZ. Kataloh [SLEMZ. Catalogue]. Available at: <https://konsolnik.com.ua/nasosy-sektsionnye-tsns-tsns/> (accessed 27.07.2023).
 - Kocaaslan O., Ozgoren M., Aksoy M. H., Babayigit O. Experimental and Numerical Investigation of Coating Effect on Pump Impeller and Volute. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016, vol. 9, no. 5, pp. 2475–2487. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.236.25094
 - Alawadhi K., Alzuwayer B., Mohammad T. A., Buhemdi M. H. Design and Optimization of A Centrifugal Pump for Slurry Transport Using Response Surface Method. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 60. doi: 10.3390/machines9030060
 - Rogovyi A. S., Azarov A. S., Demchuk R. M. Udosoknalennya kharakterystyk robochoho kola vysokonapimoho vidtsentrovoho kompresora proektuvanniam za dopomohoyu SAPR [Improving characteristics of the impeller of a high-pressure centrifugal compressor by designing with the help of CAD]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
 - Rzhebeyeva N. K., Rzhebeyev E. Ye. *Rozrakhunok i konstruyuvannya vidtsentrovoykh nasosiv* [Calculation and design of centrifugal pumps]. Sumy, SumDU Publ., 2009. 220 p.

Надійшло (received) 15.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Шевченко Наталія Григорівна (Shevchenko Nataliia) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6877-7428>; e-mail: nataliia.shevchenko@kpi.edu.ua

Лебединець Денис Віталійович (Lebedynets Denys) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістрант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3344-3130>; e-mail: denys.lebedynets@mit.khpi.edu.ua