

Є. С. КРУПА, О. В. ДМИТРИЄНКО, І. І. ТИНЯНОВА, В. О. НЕДОВЕСОВ

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОНАПІРНОЇ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ГІДРОТУРБИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ CFD

В даний час розвиток пакетів прикладних програм для розрахунку задач обчислювальної гідроаеродинаміки досяг високого рівня ефективності, точності і гнучкості, з їх допомогою можна вирішувати самі різноманітні та складні задачі. Всі сучасні пакети програм обчислювальної гідроаеродинаміки вирішують завдання механіки суцільного середовища, використовуючи моделі, побудовані на основі рівнянь Нав'є-Стокса. В основу цих моделей входять три рівняння збереження: збереження маси, збереження імпульсу і збереження енергії. Було проведено чисельне моделювання просторового потоку високонапірної радіально-осьової гідротурбіни РО 310 для двох варіантів проточної частини – с робочим колесом, що має 15 лопатей (модифікація 1) та з 17 лопатями (модифікація 2), з використанням пакета прикладних програм OpenFOAM. Програмний комплекс OpenFOAM є одним з найбільш використовуваних продуктів, призначених для вирішення завдань гідроаеродинаміки, що розповсюджуються за вільною ліцензією GPL (General Purpose License). Процес вирішення поставлених гідродинамічних задач за допомогою програмного комплексу CFD (Computational fluid dynamics) включає в себе наступні етапи: створення тривимірної моделі розглянутого об'єкта за допомогою системи автоматичного проектування; побудова розрахункової сітки з необхідними параметрами; вибір математичної моделі, яка найточніше описує робочий процес в проточних частинах гідромашин; вибір відповідної моделі турбулентності; завдання граничних умов. Приведено візуалізацію результатів чисельного дослідження двох модифікацій гідротурбіни РО 310-В100. Представлено методику розрахунку гідравлічних втрат в проточній частині гідротурбіни. Виконано аналіз результатів чисельного моделювання. Даний аналіз показав, що модифікація гідротурбіни з робочим колесом, що має 15 лопатей, краща по значенню КПД, ніж модифікація з 17 лопатями. Порівняння двох модифікацій проводилося виключно по значенням гідравлічного КПД гідротурбіни.

Ключові слова: гідравлічні машини, робоче колесо, гідродинамічний розрахунок, коефіцієнт корисної дії, математична модель, просторова течія.

Е. С. КРУПА, О. В. ДМИТРИЕНКО, И. И. ТЫНЯНОВА, В. А. НЕДОВЕСОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОНАПОРНОЙ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CFD

В настоящее время развитие пакетов прикладных программ для расчета задач вычислительной гидроаэродинамики достигло высокого уровня эффективности, точности и гибкости, с их помощью можно решать самые разнообразные и сложные задачи. Все современные пакеты программ вычислительной гидроаэродинамики решают задачи механики сплошной среды, используя модели, построенные на основе уравнений Навье-Стокса. В основу этих моделей входят три уравнения сохранения: сохранения массы, сохранения импульса и сохранения энергии. Было проведено численное моделирование пространственного потока высоконапорной радиально-осевой гидротурбины РО 310 для двух вариантов проточной части – с рабочим колесом, имеющим 15 лопастей (модификация 1) и с 17 лопастями (модификация 2), с использованием пакета прикладных программ OpenFOAM. Программный комплекс OpenFOAM является одним из наиболее используемых продуктов, предназначенных для решения задач гидродинамики, и распространяется по свободной лицензии GPL (General Purpose License). Процесс решения поставленных гидродинамических задач с помощью программного комплекса CFD (Computational fluid dynamics) включает в себя следующие этапы: создание трехмерной модели рассматриваемого объекта с помощью системы автоматизированного проектирования; построение расчетной сетки с необходимыми параметрами; выбор математической модели, которая наиболее точно описывает рабочий процесс в проточных частях гидромашин; выбор подходящей модели турбулентности; задания граничных условий. Приведена визуализация результатов численного исследования двух модификаций гидротурбины РО 310-В100. Представлена методика расчета гідравлічних втрат в проточній частині гідротурбіни. Выполнен анализ результатов численного моделирования. Данный анализ показал, что модификация гидротурбины с рабочим колесом, имеющим 15 лопастей, лучше по значению КПД, чем модификация с 17 лопастями. Сравнение двух модификаций проводилось исключительно по значениям гидравлического КПД гидротурбины.

Ключевые слова: гидравлические машины, рабочее колесо, гидродинамический расчет, коэффициент полезного действия, математическая модель, пространственное течение.

E. KRUPA, O. DMYTRIENKO, I. TYNIANOVA, V. NEDOVESOV

FORECASTING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A HIGH-PRESSURE RADIAL-AXIAL HYDROTURBINE USING THE CFD SOFTWARE COMPLEX

At present, the development of software packages for calculating computational fluid dynamics problems has reached a high level of efficiency, accuracy and flexibility, with their help it is possible to solve the most diverse and complex problems. All modern software packages for computational fluid dynamics solve the problems of continuum mechanics using models based on the Navier-Stokes equations. These models are based on three conservation equations: conservation of mass, conservation of momentum and conservation of energy. A numerical simulation of the spatial flow of a high-pressure radial-axial hydraulic turbine RO 310 was carried out for two variants of the flow path – with an runner with 15 blades (modification 1) and with 17 blades (modification 2), using the OpenFOAM software package. The OpenFOAM software package is one of the most used products designed to solve fluid dynamics problems and is distributed under a free GPL license (General Purpose License). The process of solving the set hydrodynamic problems using the CFD (Computational fluid dynamics) software package includes the following stages: creating a three-dimensional model of the object under consideration using a computer-aided design system; construction of a computational grid with the required parameters; selection of a mathematical model that most accurately describes the working process in the flow parts of hydraulic machines; selection of a suitable turbulence model; setting boundary conditions. A visualization of the results of a numerical study of two modifications of the RO 310-V100 hydraulic turbine is presented. A method for calculating hydraulic losses in the flow path of a hydraulic turbine is presented. The analysis of the results of numerical simulation was performed. This analysis showed that the modification of a hydraulic turbine with an runner with 15 blades is better in terms of efficiency than the modification with 17 blades. Comparison of the two modifications was carried out solely by the values

© Є. С. Крупа, О. В. Дмитрієнко, І. І. Тинянова, В. О. Недовесов, 2020

of the hydraulic efficiency of the hydraulic turbine.

Keywords: hydraulic machines, runner, hydrodynamic calculation, efficiency, mathematical model, spatial flow.

Вступ. З розвитком методів математичного моделювання і широким впровадженням в інженерну практику ЕОМ з'явилася можливість заміни фізичного експерименту чисельним. Застосування чисельного моделювання надзвичайно розширює можливості аналізу впливу геометричних параметрів гідромашини на кінематичні та енергетичні характеристики. Чисельний експеримент дозволяє оцінити вплив окремих геометричних параметрів не тільки на енергетичні характеристики гідротурбіни (ГТ) в цілому, але й на кінематичні характеристики окремих її елементів, а також на категорії втрат в цих елементах. Останні дозволяють намітити шляхи для зменшення окремих видів втрат, що дає основу для вдосконалення енергетичних характеристик гідротурбіни в цілому.

Для малих і середніх гідроелектростанцій проведення випробувань модельних гідротурбін невиправдано дороге, і багато фірм для контролю енергетичних параметрів вимагають проведення розрахунків з використанням пакетів програм для чисельного моделювання просторової течії. Візуалізація результатів розрахунку кінематики тривимірної течії, інформація про втрати та розподіл досліджуваних параметрів в проточній частині (ПЧ) гідротурбіни дають можливість на стадії проектування зрозуміти шляхи досягнення більш високих значень ККД. Також з'являється можливість отримати інформацію про моменти на лопатках направляючого апарату (НА) і лопатках робочого колеса (РК).

Однією з переваг чисельного моделювання є можливість дослідження властивостей об'єкта у великому діапазоні змінних параметрів і при різному їх поєднанні.

Рішення обчислювальної гідродинамічної задачі відбувається в три етапи. На першому створюється геометрія, будується обчислювальна сітка, задаються граничні умови, на другому етапі відбувається рішення з використанням вирішувача (solver'a), відповідного конкретній розв'язуваній проблемі. На останньому етапі, за допомогою спеціальних програмних інструментів – пост-процесорів, отримані результати представляються графічно і аналізуються.

В останні 15–20 років простежується тенденція збільшення частки чисельного експерименту при дослідженні робочого процесу гідротурбін. Проведення чисельного експерименту дозволяє зменшити фінансові витрати на проведення лабораторних випробувань модельної гідротурбіни на гідродинамічних стендах, а також дозволяє у більш швидкі строки спроектувати високоефективну гідротурбіну, яка відповідає всім вимогам замовника. Також результати чисельного дослідження дозволяють отримати більш чітку інформацію о процесах, які проходять у проточній частині гідротурбіни. Тому прогнозування енергетичних характеристик гідротурбін з використанням сучасних програмних комплексів CFD є актуальним завданням

гідротурбобудування.

Також слід відзначити, що на сьогоднішній день в більшості досліджень розрахунки виконувалися за допомогою комерційних програмних комплексів, таких як ANSYS CFX, ANSYS Fluent, FlowVision. Інші пакети розглядалися в меншій мірі. Тому актуальним є питання чисельного моделювання просторового потоку в проточних частинах гідротурбін за допомогою вільно поширюваного програмного забезпечення, до якого, зокрема відноситься програмний комплекс OpenFOAM.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Починаючи з 90-х років минулого століття і по теперішній час було випущено велику кількість публікацій, присвячених чисельному моделюванню в гідротурбінах, що свідчить про важливість даних досліджень.

В науковій публікації [1] відмічено, що в даний час розвиток комерційних пакетів, таких як Ansys CFX, Ansys FLUENT, FlowVision, IPMFlow досяг високого рівня ефективності, точності і гнучкості. З їх допомогою можна вирішувати самі різноманітні та складні задачі. Більш того, сьогодні важко уявити розвиток таких галузей як енергомашинобудівна, автомобільна, авіаційна або аерокосмічна без використання цих пакетів.

Аналізу турбулентного реального потоку в проточній частині радіально-осьової гідротурбіни присвячена робота [2], для проведення чисельного експерименту було використано комерційний програмний комплекс Ansys CFX.

В роботі [3] запропоновано методику проектування робочих коліс ГТ, шляхом вибору оптимального числа лопатей робочого колеса. В роботі [4] проведено розрахунок течії в усій ПЧ гідротурбіни на конкретні параметри станції, в роботі [5] – аналіз кавітаційних характеристик на основі CFD розрахунків.

В роботах [6–8] приведено результати чисельного розрахунку течії в різних частинах проточного тракту гідротурбін, а саме у спіральній камері [6], направляючому апараті та робочому колесі [7, 8].

Але в даний час залишаються не повністю вирішеними питання щодо алгоритму розрахунку, якості розрахункової сітки, вибору моделі турбулентності, порядку вирішення рівнянь [9]. Однією з причин є об'єктивні труднощі, пов'язані з високою вартістю ліцензій на комерційні програмні комплекси, що часто робить чисельні дослідження просторового потоку в гідромашинах недоцільними.

Вартість однієї ліцензії HPC Academic Associate (ліцензія для академічних організацій, що дає право на проведення комерційних досліджень), з можливістю паралельної роботи на декількох обчислювальних ядрах може становити десятки тисяч євро на рік.

Проблема зниження вартості паралельних обчислень може бути вирішена, зокрема, шляхом

використання вільно поширюваного програмного забезпечення. В даний час існує декілька десятків спеціальних ліцензій, що дозволяють поширювати програмні продукти. Найбільш поширеною є ліцензія GNU GPL (General Purpose License), єдиним обмеженням якої є необхідність обов'язкового посилання на авторів. Використання програмного забезпечення, яке розповсюджується за вільними ліцензіями (GPL) спільно з вихідним кодом, надають можливість побудови призначених для користувача моделей. Дана ліцензія відкриває доступ до вихідного коду і не накладає будь-яких обмежень при використанні наявних можливостей пакету, зокрема, при паралельних розрахунках. Одним з найбільш використовуваних продуктів, призначених для вирішення завдань обчислювальної гідроаеродинаміки, і розповсюджуються за ліцензією GPL, є пакет OpenFOAM [10]. В даний час пакет OpenFOAM підтримується і розповсюджується фірмами OpenCFD Ltd, Wikki Ltd, які займаються розробкою, розповсюдженням, підтримкою і навчанням користувачів [10].

Пакет OpenFOAM, написаний на мові C++, і використовує об'єктно-орієнтовані методи програмування. Програмне забезпечення включає як готові модулі рішення широкого кола завдань механіки суцільного середовища, так і дозволяє розробляти власні моделі під різні завдання [10].

Саме використанню пакету OpenFOAM для гідродинамічних розрахунків і присвячені наукові публікації [11–13]. В роботі [11] проведено дослідження кавітаційних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни, в статті [12] розглядається вплив форми колон статору на структуру потоку у підводі гідротурбіни. В роботі [13] обговорюються попередні результати об'єднання розробленої бібліотеки з пакетом OpenFOAM для прискорення завдань гідродинамічного моделювання.

Але на даний час недостатньо наукових робіт, пов'язаних з розрахунком та прогнозуванням енергетичних та кінематичних характеристик гідротурбін саме в цьому програмному комплексі [1, 11].

Проведений аналіз [11, 12] дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення чисельного дослідження та апробація програмного комплексу OpenFOAM для розрахунку енергетичних і кінематичних параметрів радіально-осьових гідротурбін.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є дослідження енергетичних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни PO 310 з використанням програмного комплексу OpenFOAM та вибір модифікації з кращими енергетичними показниками на основі проведеного чисельного експерименту.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- запропонувати методику розрахунку течії в радіально-осьових (РО) гідротурбінах від входу в спіральну камеру (СК) до виходу з відсмоктуючої

труби (ВТ);

- визначити раціональні параметри розрахункової моделі: тип і розмір сітки, модель турбулентності, граничні умови та інші;

- розробити методику розрахунку інтегральних параметрів гідротурбін. Розрахувати енергетичні характеристики РО гідротурбін для двох модифікацій робочих коліс і провести їх порівняння з експериментальними даними, отриманими на модельних стендах.

Методика розрахунку просторової течії для високонапірної гідротурбіни PO 310.

Об'єкт дослідження. Умови проведення розрахунків. В якості об'єкта дослідження було розглянуто проточну частину гідротурбіни PO 310 (спіральна камера, статор, направляючий апарат, робоче колесо, відсмоктуюча труба).

Основні геометричні характеристики елементів ПЧ:

1) спіральна камера металева з круглими та еліптичними меридіональними перетинами; кут обхвату в плані $\varphi_{\text{сп}} = 345^\circ$. Статор складається з 19 колон, включаючи зуб спіралі;

2) профіль лопатки направляючого апарату симетричний, висота $b_0 = 0,12 D_1$, діаметр розташування осей повороту лопаток $D_0 = 1,2 D_1$, число лопаток $z_0 = 24$;

3) число лопатей робочого колеса $z_1 = 15$ (модифікація 1), $z_1 = 17$ (модифікація 2);

4) параметри відсмоктуючої труби: висота $h = 3,95 D_1$, довжина $L = 4 D_1$, коліно типу КУ-3РО.

Створення геометричної моделі проточної частини PO 310. В даний час існує цілий ряд програмних продуктів, які дозволяють ефективно виконати це завдання, а саме SolidWorks, T-Flex, Unigraphics, AutocadMechanicalDesktop, ProEngineer, Catia, Компас 3D та ін. [9, 12].

Розрахунок течії води в гідроагрегаті є завданням внутрішньої течії, тому в OpenFOAM достатньо імпортувати геометрію ПЧ. При цьому внутрішній об'єм ПЧ повинен бути представлений як твердотільна модель.

Швидкість чисельного розрахунку просторового потоку у програмному комплексі OpenFOAM залежить від конфігурації персонального комп'ютера (ПК), на якому здійснюється даний розрахунок. Об'єкт дослідження в даній роботі, а саме гідротурбіна PO 310, має складну «геометрію», тому для побудови розрахункової сітки та подальшого розрахунку ситуація потребуватиме досить великих затрат часу та обчислювальної потужності ПК. Для скорочення часу розрахунку в даній роботі було використано «секторний» підхід, коли складні криволінійні елементи конструкції гідротурбіни замінюються секторами. Наприклад, направляючий апарат, що має 24 лопатки, буде представлено одним сектором, що включає в себе одну лопатку; робоче колесо буде представлено одним сектором, що включає в себе лопать та міжлопатеві канали.

Просторову модель об'єкту дослідження, а саме гідротурбіни PO 310 представлено на рис. 1.

Математична модель. Одним з головних етапів вирішення задачі є вибір моделі розрахунку.

На першому розрахунковому етапі середовище припускається однофазним нестискуваним в'язким, течія – турбулентна. Процес, що моделюється припускається ізотермічним.



Рис. 1. Твердотільна модель проточної частини гідротурбіни РО 310

Критерієм турбулентності є число Рейнольдса.

Для математичного моделювання турбулентної течії в ПЧ гідротурбіни РО 310 було використано систему рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності (1), осереднених по Рейнольдсу [1, 6].

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{cases} \quad (1)$$

де $i, j = 1 \dots 3$ – сумування за однаковими індексами;

x_1, x_2, x_3 – осі координат;

u_1, u_2, u_3 – осереднені за часом значення швидкостей;

f_i – виражає дію масових сил.

Течія в обертових робочих органах розглядається у відносній системі координат, при цьому член f_i в правій частині рівняння виражає дію відцентрових і коріолісових сил:

$$\vec{f}_i = -\rho(2\vec{\omega} \times \vec{u} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})),$$

де ω – кутова швидкість обертання;

\vec{r} – радіус-вектор (модуль якого дорівнює відстані від даної точки до осі обертання).

Для замикання системи рівнянь (1) в даній роботі була використана k - ϵ модель турбулентності.

В сучасних програмних продуктах широко використовується k - ϵ модель турбулентності, а також її модифікації. При використанні цієї моделі система рівнянь руху рідини доповнюється двома диференціальними рівняннями (2) та (3) що описують перенос відповідно кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації ϵ [2, 7].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \epsilon; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j \epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\epsilon}{k} \times \\ \times (C_{\epsilon 1} P_k - \rho C_{\epsilon 2} \epsilon), \end{aligned} \quad (3)$$

де $P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$ – член, що виражає генерацію енергії k ,

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k},$$

$$\Gamma_\epsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}.$$

Параметри ϵ і μ визначаються наступним чином:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2},$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}.$$

Завдання граничних умов. Чисельні дослідження виконано для моделі з діаметром РК $D_1 = 1$ м при напорі $H = 1$ м для оптимального режиму роботи гідротурбіни, згідно універсальної характеристики РО 310/1107-В-38,8. Відкриття НА для оптимального режиму $a_0 = 51,55$ мм (для $D_1 = 1$ м). Приведені оберти $n'_i = 63,5$ об/хв.

На межах розрахункових областей задавалися наступні параметри:

- на вході – масова режимна витрата;

- на стінці – умова прилипання (швидкість дорівнює нулю);

- на виході – статичний тиск $P = 101325$ Па.

Завдання вихідної розрахункової сітки. Одним з найважливіших етапів створення розрахункової моделі є побудова розрахункової сітки. Побудова розрахункової сітки – це процес розбиття розрахункової області на безліч окремих комірок. Комірки сітки являють собою багатогранники, зазвичай тетраедри, гексаедри, призми або піраміди. Кромки цих комірок утворюють лінії розрахункової сітки, а точки, розташовані на крайках або в центрі комірок – вузли розрахункової сітки. В результаті чисельного рішення рівнянь математичної моделі саме у вузлах розрахункової сітки і визначаються шукані параметри течії [9].

Дискретизацію досліджуваної проточної частини виконано з допомогою неструктурованої сітки з комірками тетраедральної форми з локальним згущенням біля кромки колон статора, лопаток НА, лопатей РК (рис. 2).

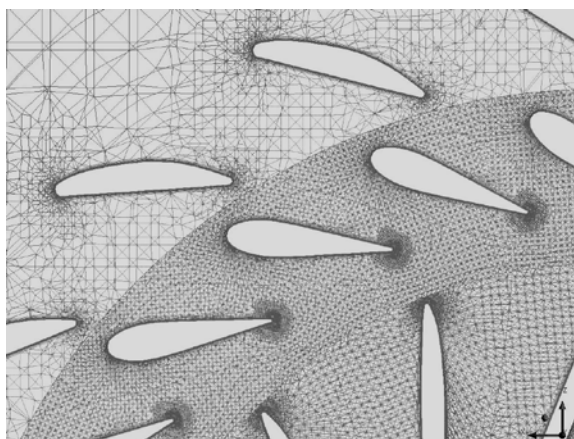


Рис. 2. Розрахункова сітка моделі

Загальне число елементів – 7,5 млн: СК з колонами статора – 3,1 млн; один міжлопатковий канал НА – 500 тис.; один міжлопатковий канал РК – 2,7 млн; відсмоктуюча труба – 1,2 млн.

Для якісного описання пограничного шару на стінках областей будувалися призматичні комірки.

Чисельне дослідження потоку в проточній частині РО 310 для двох модифікацій робочого колеса. Згідно рекомендацій, прийнятих в гідротурбобудуванні, для напорів вище 300 м число лопатей робочого колеса приймають $z = 13-19$.

В даній роботі було проведено чисельне дослідження просторового потоку для двох варіантів

проточних частин:

- 1) ПЧ гідротурбіни РО 310 з робочим колесом з 15 лопатями (модифікація 1);
- 2) ПЧ гідротурбіни РО 310 з робочим колесом з 17 лопатями (модифікація 2).

В результаті проведення чисельного експерименту отримано і проаналізовано наступні дані для двох модифікацій РК:

- візуалізацію потоку (поля швидкостей та тисків) в характерних перетинах ПЧ гідротурбіни РО 310;
- епюри розподілу швидкостей та тиску вздовж лицьової та тильної поверхонь лопаті робочого колеса;
- гідравлічний момент на валу гідроагрегату;
- гідравлічний ККД гідротурбіни;
- значення гідравлічних втрат енергії у підводі, робочому колесі та відсмоктуючій трубі.

Візуалізація результатів чисельного експерименту для двох модифікацій гідротурбіни РО 310.

Модифікація 1. На рис. 3–5 приведено візуалізацію частини результатів розрахунку просторового потоку в пакеті OpenFOAM для модифікації 1 (гідротурбіна РО 310 з робочим колесом, що має 15 лопатей).

Модифікація 2. На рис. 6–8 приведено візуалізацію частини результатів розрахунку просторового потоку для модифікації 2 (гідротурбіна РО 310 з робочим колесом, що має 17 лопатей).

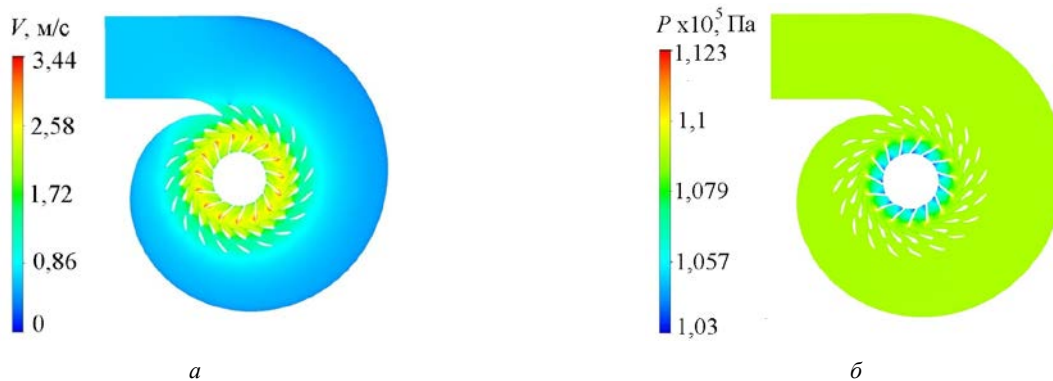


Рис. 3. Розподіл кінематичних параметрів в середньому перетині по висоті направляючого апарату: а – абсолютна швидкість; б – повний тиск

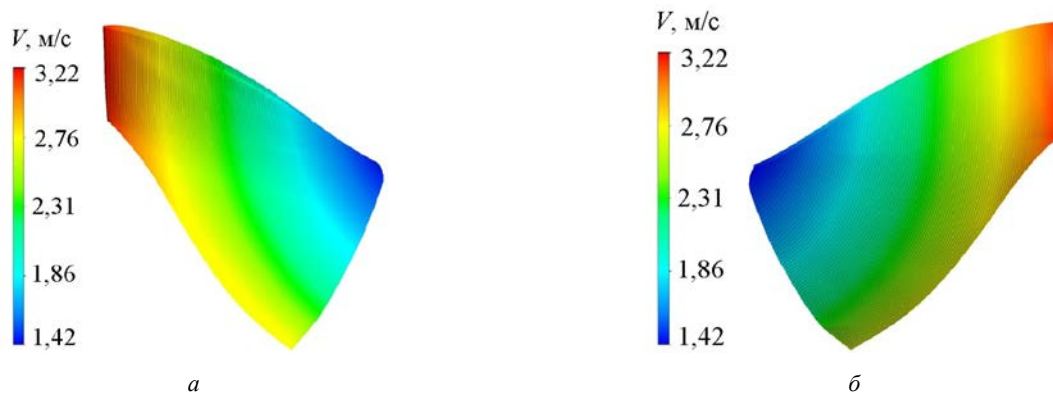


Рис. 4. Розподіл швидкостей вздовж поверхонь лопаті робочого колеса: а – лицьова сторона; б – тильна сторона

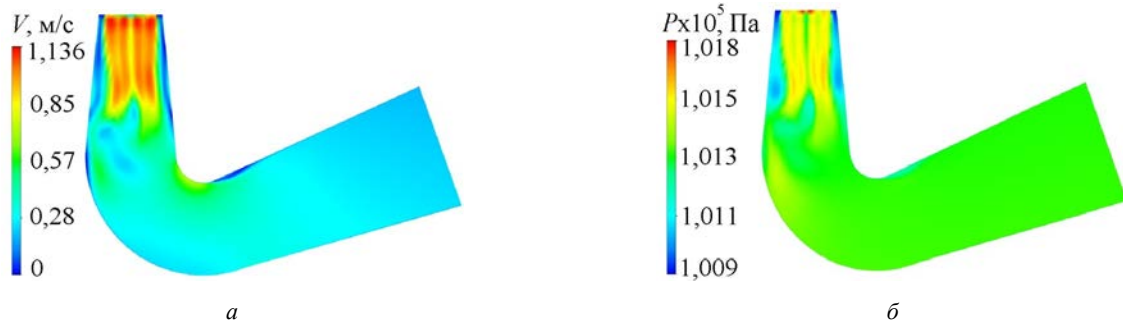


Рис. 5. Розподіл кінематичних параметрів у відсмоктуючій трубі:
 а – абсолютна швидкість; б – повний тиск

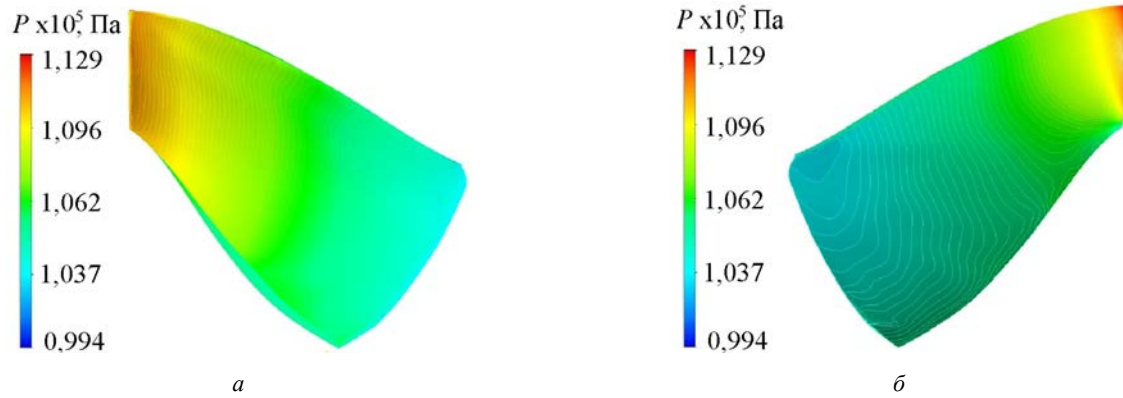


Рис. 6. Розподіл повного тиску вздовж поверхонь лопаті робочого колеса:
 а – лицьова сторона; б – тильна сторона

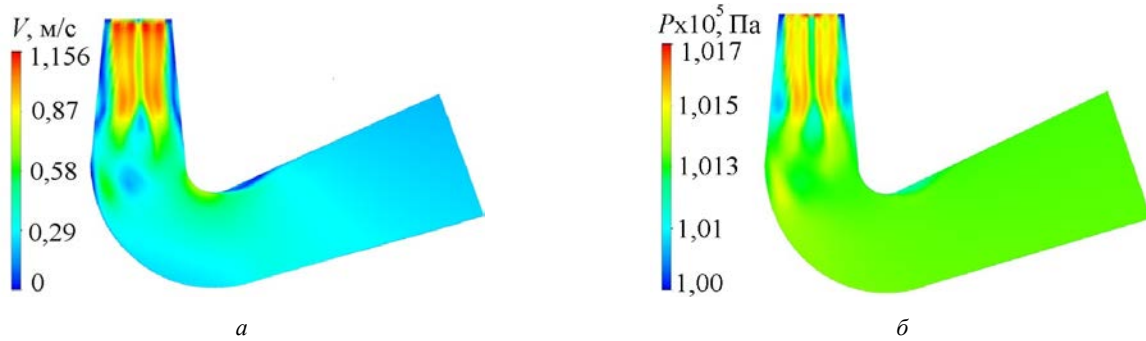


Рис. 7. Розподіл кінематичних параметрів у відсмоктуючій трубі:
 а – абсолютна швидкість; б – повний тиск

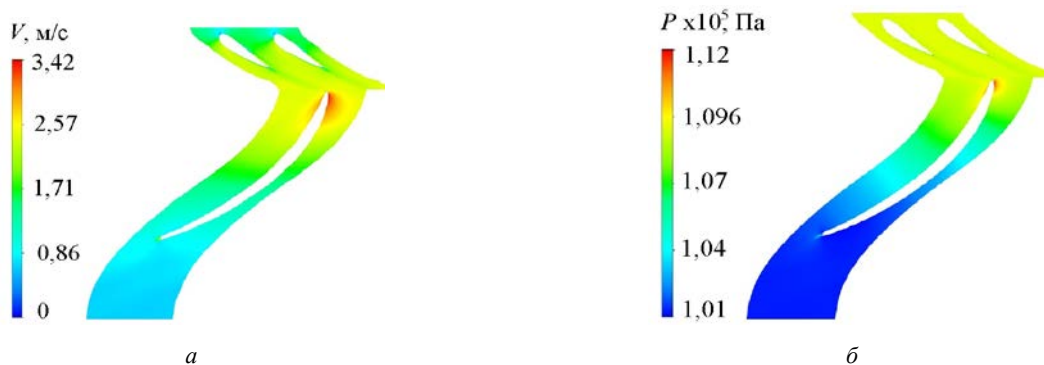


Рис. 8. Кінематичні параметри потоку у решітках направляючого апарату та робочого колеса:
 а – швидкість; б – повний тиск

Аналіз отриманих результатів чисельного моделювання. Аналізуючи результати чисельного розрахунку потоку в ПЧ гідротурбіни РО 310 можна

виділити наступні моменти:
 - характер течії у всіх елементах проточної частини фактично однаковий як для модифікації 1, так

і для модифікації 2, відрізняються лише чисельні значення величин;

- течія в спіральній камері рівномірна (рис. 3);
- обтікання колон статора та лопаток направляючого апарату проходить без суттєвих відривів потоку (рис. 4, 8);
- в робочому колесі в районі вхідної кромки спостерігається наявність піків швидкостей (рис. 4, 8);
- мінімальні величини тиску спостерігаються на тильній стороні лопаті вздовж вихідної кромки (рис. 6);
- течія рідини в ВГ характеризується нерівномірністю значень швидкості (рис. 5, 7). У вертикальному дифузори за обтікачем спостерігається вихровий джгут (рис. 5, 7). В коліні і у вихідному дифузори є так звані застійні зони, де швидкість потоку близька до нуля (рис. 5, 7).

Методика розрахунку гідравлічних втрат в елементах проточної частини. Сумарні втрати в підводі (спіральна камера, статор, направляючий апарат) та відсмоктуючій трубі обчислювалися як різниця повної енергії на вході та виході, поділена на питому вагу.

$$h = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}}{\rho g}$$

Сумарні втрати в РК обчислювалися за формулою:

$$h_{\text{РК}} = 1 - \eta_{\Gamma} = 1 - \frac{N_{\text{еф}}}{\rho g Q_{\text{к}} H_{\text{к}}} = 1 - \frac{M\omega}{\rho g Q_{\text{к}} H_{\text{к}}}$$

Гідравлічний ККД гідротурбіни РО 310 визначався за формулою:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{N_{\text{еф}}}{\rho g QH} = \frac{M\omega}{\rho g QH}$$

де Q – витрата рідини через гідротурбіну;
 H – напір гідротурбіни.

Значення моменту M на валу гідроагрегату було отримано в результаті чисельного експерименту.

В табл. 1 приведено значення величин втрат в елементах проточної частини гідротурбіни РО 310 для двох модифікацій РК.

В табл. 2 представлено порівняння значень гідравлічного ККД, отриманих у результаті чисельного експерименту з ККД згідно універсальної характеристики модельної гідротурбіни РО 310/1107-В-38,8 для оптимального режиму роботи гідроагрегату.

Таблиця 1 – Гідравлічні втрати в проточній частині

Елементи проточної частини	Модифікація 1 (15 лопатей)	Модифікація 2 (17 лопатей)
Підвід (СК+статор+НА), %	2,0	2,1
Робоче колесо, %	3,8	4,0
Відсмоктуюча труба, %	2,1	2,3

Аналізуючи табл. 1 можна зробити висновок, що модифікація 1 має менші значення гідравлічних втрат у всіх елементах проточної частини в порівнянні з модифікацією 2.

Таблиця 2 – Гідравлічний ККД гідротурбіни РО 310 (на оптимальному режимі роботи)

Гідравлічний ККД, %	Модифікація 1 (15 лопатей)	Модифікація 2 (17 лопатей)
ККД гідротурбіни (по універсальній характеристиці РО 310/1107-В-38,8)	92,4	
ККД гідротурбіни (за результатами чисельного експерименту)	92,1	91,6

З табл. 2 видно, що отримані в результаті чисельного дослідження значення гідравлічного ККД гідротурбіни адекватно співпадають з аналогічними значеннями експериментальних досліджень (універсальна характеристика РО 310/1107-В-38,8).

Обговорення результатів використання програмного комплексу OpenFOAM для прогнозування енергетичних характеристик гідротурбін. Отримані результати чисельного моделювання просторової течії в проточній частині високонапірної гідротурбіни РО 310 дали можливість виконати порівняння енергетичних показників двох модифікацій робочих коліс.

Якщо порівнювати ці дві модифікації, то можна зробити висновок, що при однаковому режимі, однакових елементах проточної частини, модифікація з РК, що має 15 лопатей дещо краща за значенням ККД. Для більш коректного порівняння потрібно враховувати питання кавітації та міцності, але в даній роботі такої задачі не стояло.

Отже, на основі результатів чисельного дослідження потоку в проточній частині гідротурбіни РО 310 виявлено, що при збільшенні лопатей робочого колеса гідравлічний ККД гідротурбіни зменшується.

Запропонована методика чисельного дослідження потоку в радіально-осьових гідротурбінах в повній постановці на персональному комп'ютері, з використанням програмного комплексу OpenFOAM, дає можливість прогнозування енергетичних характеристик. Вона забезпечує гарне узгодження отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень. Дану методику можна використовувати для надійного розрахункового визначення енергетичних і моментних характеристик радіально-осьових гідротурбін.

Слід зазначити, що даному дослідженню притаманні обмеження у обчислювальній потужності персонального комп'ютера, на якому здійснюється розрахунок. Тобто для вирішення серйозних гідродинамічних задач, якісної побудови розрахункової сітки, безпосереднього проведення чисельного експерименту досліднику потрібно мати

великі обчислювальні потужності ПК.

До недоліків даного дослідження можна віднести те, що для проведення чисельного експерименту було запропоновано стандартну k - ϵ модель турбулентності. Хоча вона й добре зарекомендувала себе у гідродинамічних розрахунках просторового потоку гідромашин, але більш надійною та точною для широкого діапазону турбулентних потоків є SST (Shear-Stress-Transport) k - ω модель. Цей недолік може бути усунутий використанням SST k - ω моделі турбулентності, що покращить якість отримуваних результатів чисельного розрахунку турбулентних потоків у проточних частинах гідротурбін.

В даному дослідженні проведено чисельне моделювання потоку в конкретному типі гідравлічних турбін, а саме в радіально-осьових. Розвиток представленого дослідження полягає у розробці методики прогнозування енергетичних характеристик для інших існуючих типів гідротурбін – вертикальних поворотно-лопатевої, горизонтальних капсульних та ін. Розвиток даного напрямку дослідження передбачає труднощі в розробці якісних математичних моделей, в правильності побудови розрахункових сіток об'єкту дослідження. Але, не зважаючи на можливі труднощі, цей напрям досліджень є дуже перспективним, так як розробка високоєфективного гідроенергетичного обладнання є стратегічним питанням для розвитку енергетичної системи України.

Висновки. 1. Запропоновано методику розрахунку просторової течії в проточній частині радіально-осьової гідротурбіни у повній постановці (від входу в спіральну камеру до виходу з відсмоктуючої труби). Для зменшення часу на проведення чисельних розрахунків було запропоновано «секторний» підхід при побудові просторової моделі об'єкту дослідження.

2. Визначено раціональні параметри розрахункової моделі та проведено чисельний експеримент, за допомогою програмного комплексу OpenFOAM для двох модифікацій ПЧ радіально-осьової гідротурбіни РО 310.

3. Представлено методику розрахунку інтегральних параметрів гідротурбін, а саме коефіцієнту корисної дії, моменту на валу гідроагрегату, потужності, на основі чисельного моделювання просторового потоку.

Прорахувавши дві модифікації ПЧ, було зроблено висновок, що кращим варіантом є модифікація 1 з РК, що має 15 лопатей. Порівняння проводилося виключно по ККД гідротурбіни. Питання кавітації та міцності в даній роботі не розглядалися.

Проведене чисельне дослідження дозволяє зробити висновок про те, що пакет з відкритим вихідним кодом OpenFOAM може бути успішно використаний в якості альтернативи комерційним пакетам програм обчислювальної гідродинаміки (CFD). Програмний комплекс OpenFOAM можна використовувати для чисельного моделювання потоку у ПЧ гідротурбін, подальшого аналізу результатів та оптимізації елементів ПЧ для покращення енергетичних характеристик гідротурбіни.

Список літератури

1. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 53–57.
2. Khare R., Prasad V., Kumar S. CFD approach for flow characteristics of hydraulic Francis turbine. *International Journal of Engineering Science and Technology.* 2010. Vol. 2 (8). P. 3824–3831.
3. Brijkishore, Khare R., Prasad V. Performance Evaluation of Kaplan Turbine with Different Runner Solidity Using CFD. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* Singapore: Springer, 2020. P. 757–767. doi: 10.1007/978-981-13-8196-6_67
4. Wahidullah H. S., Prasad V. Design and pernmance analysis of Francis turbine for hydro power station on Kunar river using CFD. *International Journal of Advanced Research.* 2017. No. 5 (5). P. 1004–1012.
5. Pankaj G., Rajeshwer S. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant. *Journal of Applied Fluid Mechanics.* 2016. No. 9 (1). P. 357–365. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.24080
6. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical reseach of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 7 (1229). P. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
7. Dehkharghani A. S., Cervantes M. J., Aidanpää J. O. Numerical analysis of fluid-added parameters for the torsional vibration of a Kaplan turbine model runner. *Advances in Mechanical Engineering.* 2017. Vol. 9, iss. 10. P. 1–10. doi: 10.1177/1687814017732893
8. Brekke H. Design, Performance and Maintenance of Francis Turbines. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering.* 2013. Vol. 13 (5). P. 28–40.
9. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering.* 2015. Vol. 5. P. 399–410.
10. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox.* URI: <http://www.openfoam.com> (дата звернення: 04.03.2020).
11. Zhang H., Zhang L. Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering.* 2012. Vol. 31. P. 156–165. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1006
12. Крупа С. С. Чисельне моделювання просторового потоку в підводі осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 42 (1264). P. 77–83.
13. Krasnopolsky B., Medvedev A. Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing.* Amsterdam: IOS Press. 2016. Vol. 27. P. 93–102. doi: 10.3233/978-1-61499-621-7-93
14. Кочевский А. Н., Неня В. Г. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопатных гидромашиннах. *Вісник Сумського державного університету: Сер.: Технічні науки.* Суми: СумДУ. 2003. № 13 (59). С. 195–210.
15. Миронов К. А., Олексенко Ю. Ю. Применение CFD при проектировании элементов проточной части гидротурбин. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 116–121.
16. Nilsson H., Cervantes M. Effect of inlet boundary conditions, on the computed flow in the Turbine-99 draft tube, using OpenFOAM and CFX. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 15.* Bristol: IOP, 2012. P. 1–9. doi: 10.1088/1755-1315/15/3/032002
17. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 129.* 2016.
18. Elin A., Lugova C., Kolesnik E. Testing of the CFX-5 package on

- the examples of flow of liquid and gas in the running parts of VNIIAEN specialization pumps: flow modeling in the flow part of the intermediate stage of the multistage centrifugal pump. *Scientific and practical journal "Pumps and equipment"*. 2007. Vol. 6 (47). P. 42–46.
19. Starodubtsev Y. V., Gogolev I. G., Solodov V. G. Numerical 3D model of viscous turbulent flow in one stage gas turbine and its experimental validation. *Journal of Thermal Science*. 2005. Vol. 14. P. 136–141.
 20. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
- References (transliterated)**
1. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 20 (1192), pp. 53–57.
 2. Khare R., Prasad V., Kumar S. CFD approach for flow characteristics of hydraulic Francis turbine. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010, vol. 2 (8), pp. 3824–3831.
 3. Brijkishore, Khare R., Prasad V. Performance Evaluation of Kaplan Turbine with Different Runner Solidity Using CFD. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore, Springer Publ., 2020, pp. 757–767. doi: 10.1007/978-981-13-8196-6_67
 4. Wahidullah H. S., Prasad V. Design and permacance analysis of Francis turbine for hydro power station on Kunar river using CFD. *International Journal of Advanced Research*. 2017, No. 5 (5), pp. 1004–1012.
 5. Pankaj G., Rajeshwer S. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016, no. 9 (1), pp. 357–365. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.224.24080
 6. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, vol. 7 (1229), pp. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
 7. Dehkharaqani A. S., Cervantes M. J., Aidanpää J. O. Numerical analysis of fluid-added parameters for the torsional vibration of a Kaplan turbine model runner. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017, vol. 9, issue 10, pp. 1–10. doi: 10.1177/1687814017732893
 8. Brekke H. Design, Performance and Maintenance of Francis Turbines. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering*. 2013, vol. 13 (5), pp. 28–40.
 9. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015, vol. 5, pp. 399–410.
 10. *OpenFOAM. The open source CFD toolbox*. Available at: <http://www.openfoam.com> (accessed 04.03.2020).
 11. Zhang H., Zhang L. Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 31. pp. 156–165. doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1006.
 12. Krupa Ye. S. Chysel'ne modelyuvannya prostorovoho potoku v pidvodi os'ovoyi povorotno-lopatevoyi hidroturbiny [Numerical simulation of the spatial flow in the approach of the Kaplan turbine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 42 (1264), pp. 77–83.
 13. Krasnopolsky B., Medvedev A. Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing*. Amsterdam, IOS Press Publ., 2016, vol. 27, pp. 93–102. doi: 10.3233/978-1-61499-621-7-93
 14. Kochevskiy A. N., Nenyva V. G. Sovremenny podkhod k modelirovaniyu i raschetu techenij zhidkosti v lopastnykh gidromashinakh [Modern approach to modeling and calculating fluid flow in blade hydraulic machines]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin: Technical Sciences Series]. Sumy, SumDU Publ., 2003, no. 13 (59), pp. 195–210.
 15. Mironov K., Oleksenko Yu. Primeneniye CFD pri proyektirovani elementov protochnoy chasti gidroturbiny [Application of CFD in design elements flow space of hydroturbine] *Visnik NTU«KhPI»*. Ser.: *Gidravlichni mashini ta gidroagregati* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydrounits]. Kharkiv : NTU "KhPI" Publ., 2016, no 20 (1192), pp. 116–121.
 16. Nilsson H., Cervantes M. Effect of inlet boundary conditions, on the computed flow in the Turbine-99 draft tube, using OpenFOAM and CFX. *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 15*. Bristol, IOP Publ., 2012, pp. 1–9. doi: 10.1088/1755-1315/15/3/032002
 17. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 129*. 2016.
 18. Elin A., Lugova C., Kolesnik E. Testing of the CFX-5 package on the examples of flow of liquid and gas in the running parts of VNIIAEN specialization pumps: flow modeling in the flow part of the intermediate stage of the multistage centrifugal pump. *Scientific and practical journal "Pumps and equipment"*. 2007, vol. 6 (47), pp. 42–46.
 19. Starodubtsev Y. V., Gogolev I. G., Solodov V. G. Numerical 3D model of viscous turbulent flow in one stage gas turbine and its experimental validation. *Journal of Thermal Science*. 2005, vol. 14, pp. 136–141.
 20. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.

Надійшла (received) 19.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Крупа Євгеній Сергійович (Крупа Евгений Сергеевич, Krupa Evgeniy) – 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/0000-0003-3997-3590>; e-mail: zhekr@ukr.net

Дмитрієнко Ольга Вячеславівна (Дмитриенко Ольга Вячеславовна, Dmytriienko Olga) – 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/0000-0002-3510-2176>; e-mail: olga_dm@meta.ua

Тиньянова Ірина Іванівна (Тыньянова Ирина Ивановна, Tynianova Iryna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1185-3458>; e-mail: t.irinai@ukr.net

Недовесов Владлен Олександрович (Недовесов Владлен Александрович, Nedovesov Vladlen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0946-0658>; e-mail: nedovesov1995@gmail.com