

*Є. С. КРУПА***ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ КАПСУЛЬНОЇ ГІДРОТУРБИНИ**

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. В останні роки був досягнутий істотний прогрес у створенні засобів моделювання та розрахунку течій рідини, що дозволяють виконувати розрахунок з настільки високою вірогідністю одержуваних результатів, що необхідний обсяг експерименту в багатьох випадках зводиться до мінімуму. Було проведено чисельне моделювання просторового потоку в горизонтальній капсульній гідротурбіні ПЛ-15ГК-100 з використанням двох сучасних програмних комплексів – комерційного FlowVision та OpenFOAM, який випущено під ліцензією GNU GPL (ліцензія вільно поширюваного програмного забезпечення з відкритим кодом). Процес вирішення поставлених гідродинамічних задач за допомогою програмних комплексів CFD (Computational Fluid Dynamics) включає в себе наступні етапи: створення тривимірної моделі об'єкта за допомогою системи автоматичного проектування; побудова розрахункової сітки з необхідними параметрами; вибір математичної моделі; вибір відповідної моделі турбулентності; завдання граничних умов. Приведено візуалізацію результатів чисельного дослідження просторового потоку по двом програмним комплексам та виконано порівняння результатів розрахунку з даними модельних випробувань. Здійснено розрахунок гідравлічних втрат в проточній частині горизонтальної гідротурбіни. Виконано аналіз результатів чисельного моделювання. Даний аналіз дозволив зробити висновок про подібність результатів розрахунку тривимірного потоку в проточній частині гідротурбіни в програмних комплексах FlowVision та OpenFoam. Отримані в результаті чисельного експерименту значення гідравлічного ККД гідротурбіни для обох програмних комплексів адекватно співпадають з аналогічними значеннями експериментальних досліджень, розбіжність складає близько 0,5 %.

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

*Є. С. КРУПА***ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КАПСУЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ**

Проведение численного эксперимента позволяет уменьшить финансовые затраты на проведение лабораторных испытаний модельной гидротурбины на гидродинамических стендах, а также позволяет в более быстрые сроки спроектировать высокоэффективную гидротурбину, которая отвечает всем требованиям заказчика. В последние годы был достигнут существенный прогресс в создании средств моделирования и расчета течений жидкости, позволяющих выполнять расчет со столь высокой вероятностью получаемых результатов, что необходимый объем эксперимента во многих случаях сводится к минимуму. Было проведено численное моделирование пространственного потока в горизонтальной капсульной гидротурбине ПЛ-15ГК-100 с использованием двух современных программных комплексов – коммерческого FlowVision и OpenFOAM, который выпущен под лицензией GNU GPL (лицензия свободно распространяемого программного обеспечения с открытым кодом). Процесс решения поставленных гидродинамических задач с помощью программных комплексов CFD (Computational Fluid Dynamics) включает в себя следующие этапы: создание трехмерной модели объекта с помощью системы автоматизированного проектирования; построение расчетной сетки с необходимыми параметрами; выбор математической модели; выбор подходящей модели турбулентности; задания граничных условий. Представлена визуализация результатов численного исследования пространственного потока по двум программным комплексам и выполнено сравнение результатов расчета с данными модельных испытаний. Осуществлен расчет гидравлических потерь в проточной части горизонтальной гидротурбины. Выполнен анализ результатов численного моделирования. Данный анализ позволил сделать вывод о сходстве результатов расчета трехмерного потока в проточной части гидротурбины в программных комплексах FlowVision и OpenFoam. Полученные в результате численного эксперимента значение гидравлического КПД гидротурбины для обоих программных комплексов адекватно совпадают с аналогичными значениями экспериментальных исследований, расхождение составляет около 0,5 %.

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

*E. KRUPA***NUMERICAL STUDY OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A HORIZONTAL CAPSULE HYDRAULIC TURBINE**

Carrying out a numerical experiment allows you to reduce the financial costs for laboratory tests of a model hydraulic turbine on hydrodynamic stands, and also allows you to design a highly efficient hydraulic turbine that meets all customer requirements in a faster time frame. In recent years, significant progress has been achieved in the creation of tools for modeling and calculating fluid flows, which make it possible to perform calculations with such a high probability of the results obtained that the required amount of experiment is in many cases reduced to a minimum. A numerical simulation of the spatial flow in a horizontal capsule hydraulic turbine PL-15GK-100 was carried out using two modern software systems – commercial FlowVision and OpenFOAM, which is released under the GNU GPL license (free open source software license). The process of solving the set hydrodynamic problems using CFD (Computational Fluid Dynamics) software systems includes the following stages: creating a three-dimensional model of an object using a computer-aided design system; construction of a computational grid with the required parameters; selection of a mathematical model; selection of a suitable turbulence model; setting boundary conditions. A visualization of the results of a numerical study of the spatial flow using two software packages is presented and a comparison of the calculation results with the data of model tests is performed. The calculation of hydraulic losses in the flow path of a horizontal hydraulic turbine is carried out. The analysis of the results of numerical modeling is carried out. This analysis made it possible to draw a conclusion about the similarity of the results of calculating the three-dimensional flow in the flow path of the hydraulic turbine in the software packages FlowVision and OpenFoam. The value of the hydraulic efficiency of the hydraulic turbine obtained as a result of the numerical experiment for both software systems adequately coincides with the analogous values of experimental studies, the discrepancy is about 0,5 %.

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

© Є. С. Крупа, 2021

**Вступ.** Основна задача гідромеханічного розрахунку гідротурбіни в тому, щоб правильно і раціонально спроектувати її проточну частину (ПЧ), яка, в першу чергу, повинна забезпечити отримання необхідної потужності при найменших габаритах і високих енергетичних і кавітаційних показниках турбіни. Рішення даної задачі пов'язане із забезпеченням мінімальних втрат в елементах проточної частини для заданих приведених параметрів оптимального режиму, тобто значень приведених обертів і приведеної витрати. В даний час максимальне значення ККД гідротурбін досягає 92,5–95 % за даними модельних випробувань, в залежності від коефіцієнта швидкохідності.

Крім енергетичних характеристик, необхідно, щоб турбіна мала хороші кавітаційні показники, при яких буде відсутня розвинена кавітація на всіх робочих режимах гідротурбіни. В даний час цей аспект жорстко регламентується тендерною документацією і відстежується в ході досліджень на моделі турбіни. В процесі проектування гідротурбіни доводиться враховувати різні, часто суперечливі вимоги до геометрії проточної частини. Наприклад, оптимальна з точки зору енергетичних показників геометрія робочого колеса (РК) може виявитися неприйнятною з точки зору її кавітаційних якостей.

Для вирішення всіх перерахованих питань необхідне моделювання робочого процесу гідротурбіни. З цієї причини розвиток розрахункових методів дослідження робочого процесу і прогнозування енергетичних характеристик є однією з основних задач теорії гідротурбін.

Задачі, пов'язані з розрахунком обтікання заданих елементів проточної частини гідротурбіни і визначенням їх гідравлічних показників на різних режимах, в теорії гідротурбін називають прямими задачами. Задачі, пов'язані з проектуванням елементів проточної частини гідротурбіни на заданому розрахунковому режимі (зокрема, з визначенням геометрії лопатевих систем), в теорії гідротурбін прийнято називати зворотними задачами.

Починаючи з 90-х років минулого століття, активно почали розвиватися і використовуватися чисельні методи рішення спочатку на основі рівнянь Ейлера, а потім і усереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Однією з переваг чисельного моделювання є можливість дослідження властивостей об'єкта в великому діапазоні змінюваних параметрів і при різному їх поєднанні.

В останні роки був досягнутий істотний прогрес у створенні засобів комп'ютерного моделювання та розрахунку течій рідини, що дозволяють виконувати розрахунок з настільки високою вірогідністю одержуваних результатів, що необхідний обсяг експерименту в багатьох випадках зводиться до мінімуму [1–20].

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження енергетичних характеристик горизонтальної капсульної гідротурбіни ПЛ-15ГК з використанням двох сучасних програмних комплексів – комерційного FlowVision та OpenFOAM,

який випущено під ліцензією GNU GPL (ліцензія вільно поширюваного програмного забезпечення з відкритим кодом) та порівняння результатів розрахунку з даними модельних випробувань.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

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

- виконати розрахунок просторової течії в гідротурбіні ПЛ-15ГК-100 від входу в підвідну камеру до виходу з відсмоктуючої труби;

- провести розрахунок гідравлічних втрат в елементах проточної частини.

**Розрахунок просторового потоку в програмі FlowVision.** Сучасний комерційний програмний комплекс FlowVision в даний час широко використовується для вирішення прикладних завдань гідрогазодинаміки.

Програмний комплекс FlowVision призначений для моделювання тривимірних течій рідини і газу в технічних і природних об'єктах, а також візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки [1–4].

Моделювані течії включають в себе стаціонарні та нестаціонарні, стискувані, слабостискувані і нестискувані потоки рідини і газу. Використання різних моделей турбулентності і адаптивної розрахункової сітки дозволяє моделювати складні рухи рідини, вмикаючи течію з сильною закруткою, горінням, течії з вільною поверхнею.

FlowVision, оснований на кінцево-об'ємному методі рішення рівнянь гідродинаміки, і використовує прямокутну адаптивну сітку з локальним подібненням. Для апроксимації криволінійної геометрії з підвищеною точністю FlowVision використовує технологію підсіточного розширення геометрії. Ця технологія дозволяє імпортувати геометрію з систем САПР і обмінюватися інформацією з системами кінцево-елементного аналізу. Використання цієї технології дозволило вирішити проблему автоматичної генерації сітки – щоб згенерувати сітку, досить задати лише кілька параметрів, після чого сітка автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якого ступеня складності.

*Створення геометричної моделі в САПР та імпортування її в FlowVision.* FlowVision не має власного геометричного процесора, тому геометрія гідроагрегату повинна імпортуватися з САД-системи.

В даний час існує цілий ряд програмних продуктів, які дозволяють ефективно виконати це завдання: SolidWorks, T-Flex, Unigraphics, Autocad Mechanical Desktop, ProEngineer, Catia та ін. [3, 4].

Геометрія капсульного гідроагрегату, виконаного в САД-системі представлена на рис. 1.

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

Наступний етап підготовки геометрії полягає в поділі розрахункових областей підвода, обертового

робочого колеса і відводу. Для цього необхідно розсікти геометрію двома площинами перед і за РК. В результаті ми отримали твердотільну модель ПЧ гідроагрегату, яку далі можна імпортувати в FlowVision (рис. 2).

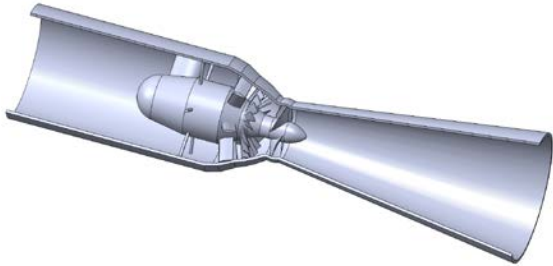


Рис. 1. Геометрія гідротурбіни ПЛ 15-ГК

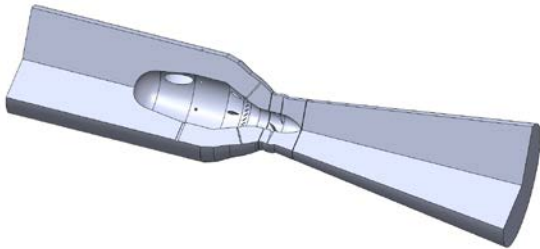


Рис. 2. Твердотільна модель проточної частини з розділеними розрахунковими областями

*Завдання моделі турбулентності.* Для поставленої задачі розрахунку капсульної гідротурбіни ПЛ15-ГК для всіх трьох розрахункових областей була використана стандартна  $k-\epsilon$  модель турбулентності. Дана модель, а також її модифікації широко використовується в сучасних програмних продуктах [2, 5, 15]. При використанні цієї моделі система рівнянь руху рідини доповнюється двома диференціальними рівняннями, що описують перенос відповідно кінетичної енергії турбулентності  $k$  і швидкості дисипації  $\epsilon$  [8, 16].

*Завдання граничних умов.* У FlowVision процес завдання граничних умов розбитий на два етапи [1, 2]:

- створення та редагування всіх необхідних граничних умов;
- розстановка граничних умов на геометричних групах.

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 ПЛ 15/984-ГК-46).

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 осередків. Осередки сітки являють собою

багатогранники, зазвичай тетраедри, гексаedr, призми або піраміди. Кромки цих осередків утворюють лінії розрахункової сітки, а точки, розташовані на крайках або в центрі осередків – вузли розрахункової сітки. В результаті чисельного рішення рівнянь математичної моделі саме у вузлах розрахункової сітки і визначаються шукані параметри течії.

FlowVision використовує локально адаптивну розрахункову сітку. Спочатку будується початкова сітка (рівномірна або нерівномірна), потім задаються критерії адаптації [1, 2].

Першим етапом створення розрахункової сітки є побудова початкової сітки (рис. 3).

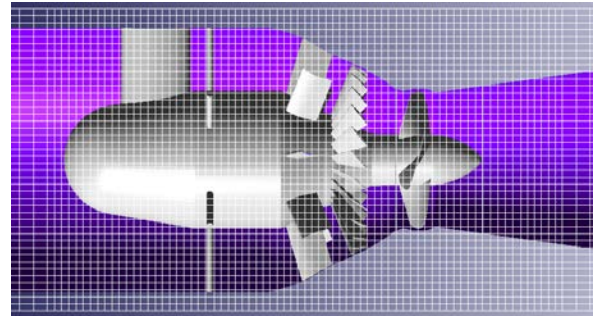


Рис. 3. Розрахункова сітка початкового рівня

Другий етап – уточнення розрахункової сітки, пов'язаний з адаптацією початкових розрахункових осередків.

У FlowVision використовується прямокутна адаптивна локально подрібнена сітка (АЛПС).

Сутність технології АЛПС полягає в наступному. У всій розрахунковій області вводиться прямокутна сітка. Виділяються підобласті з особливостями геометрії або течії, в яких необхідно провести розрахунок на більш дрібній, ніж вихідна, сітці. При цьому розрахунковий осередок, в який потрапила виділена особливість, ділиться на 8 рівних осередків (в тривимірному випадку, в двовимірному – на 4). Далі, якщо необхідно, осередки діляться ще раз і так до досягнення необхідної точності. Осередки початкової сітки називаються осередками рівня 0, осередки, одержувані подрібненням рівня 0, називаються осередками рівня 1 і т.п. При генерації АЛПС накладається умова, що гранями і ребрами можуть межувати один з одним тільки осередки з номерами рівнів, що відрізняються не більше ніж на одиницю.

*Процес рішення та візуалізація результатів розрахунку.* Перед початком вирішення програма робить побудову початкової розрахункової сітки і адаптацію початкових розрахункових осередків (рис. 4). Загальна кількість вузлів розрахункової сітки склала 10 млн.

На рис. 5–7 представлено візуалізацію потоку в проточній частині гідротурбіни ПЛ15-ГК-100 у вигляді різнобарвної заливки.

**Розрахунок просторового потоку в програмі OpenFOAM.** Загальна характеристика програмного комплексу OpenFOAM. Свою назву та ідеологію побудови пакет OpenFOAM бере від попередника

FOAM (Field Operation And Manipulation), який є закритим і продовжує розвиватися паралельно з OpenFOAM. Пакет FOAM був написаний Генрі Веллером, професором Лондонського Королівства та був проданий як комерційний компанії NABLA Ltd [6–10].

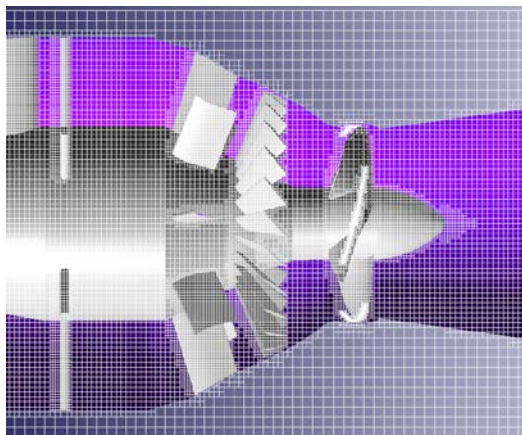


Рис. 4. Уточнення початкової розрахункової сітки

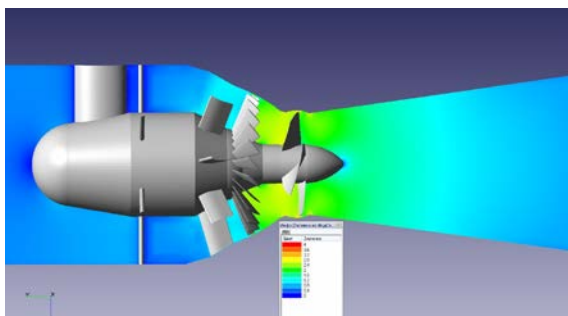


Рис. 5. Розподіл швидкості в меридіональному перерізі

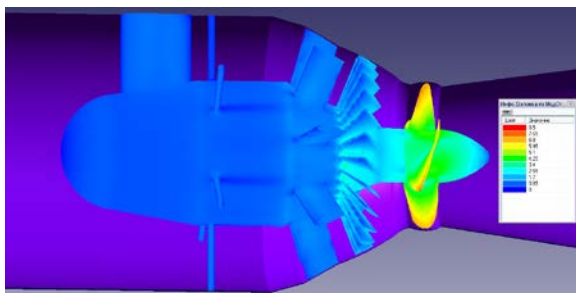


Рис. 6. Розподіл відносної швидкості потоку уздовж поверхні гідроагрегату

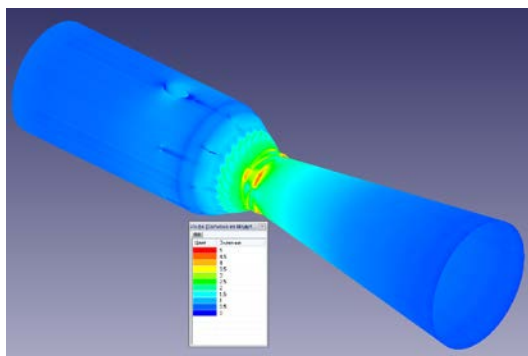


Рис. 7. Розподіл абсолютної швидкості потоку уздовж поверхні робочої камери гідроагрегату

У 2004 році починається історія пакета OpenFOAM – в цьому році пакет FOAM був випущений під ліцензією GNU GPL (ліцензія вільно поширюваного програмного забезпечення з відкритим кодом) і перейменований в OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox – вільно розповсюджуваний інструментарій обчислювальної гідродинаміки для операцій з полями). В даний час пакет OpenFOAM підтримується і розповсюджується фірмами OpenCFD Ltd, Wikki Ltd, які займається розробкою, розповсюдженням, підтримкою і навчанням користувачів [7].

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 і вирішувачі під різні завдання.

OpenFOAM на сьогодні є одним з «закінчених» і відомих додатків, призначених для FVM-обчислень.

Спочатку програма призначалася для розрахунків на міцність, але в результаті багаторічного академічного і промислового розвитку на сьогоднішній момент дозволяє вирішувати безліч різних завдань механіки суцільних середовищ, зокрема:

- розрахунки на міцність;
- гідродинаміка ньютонівських і неньютонівських в'язких рідин як в нестисливому, так і стисливому наближенні з урахуванням конвективного теплообміну та дії сил гравітації. Для моделювання турбулентних течій можливе використання RANS-моделей, LES- і DNS-методів. Можливо рішення дозвукових, навіколозвукових і надзвукових завдань;
- завдання теплопровідності в твердому тілі;
- багатозфазні завдання, в тому числі з описом хімічних реакцій компонент потоку;
- завдання, пов'язані з деформацією розрахункової сітки;
- деякі інші завдання, при математичній постановці яких потрібно рішення диференціальних рівнянь в частинних похідних в умовах складної геометрії середовища;

- розпаралелювання розрахунку для запуску на багатопроекторних системах (в т.ч. кластерних).

В основі коду лежить набір бібліотек, що надають інструменти для вирішення систем диференціальних рівнянь в частинних похідних як в просторі, так і в часі. Робочою мовою коду є ООП C++. У термінах даної мови більшість математичних диференціальних і тензорних операторів в програмному коді рівнянь може бути представлено в зрозумілій формі, а метод дискретизації і рішення для кожного оператора може бути обраний вже користувачем в процесі розрахунку. Разом з кодом поставляється набір програм-«вирішувачів», в яких реалізовані різні математичні моделі механіки суцільних середовищ.

Програма може працювати під Windows через віртуальну машину; є також реалізації, які не

використовують додаткових надбудов [7].

Пакет OpenFOAM має багато утиліт, які дозволяють конвертувати сторонні формати в формат OpenFOAM (наприклад, ANSYS, Fluent, Gambit, VTK або ін.) [6–10].

**Розрахункова сітка.** В нашому випадку дискретизацію досліджуваної проточної частини виконано з допомогою неструктурованої сітки з комірками тетраедральної форми з локальним згущенням біля крамок колон статора, лопаток НА, лопатей РК.

Швидкість чисельного розрахунку просторового потоку у будь-якому програмному комплексі CFD залежить від конфігурації ПК, на якому здійснюється даний розрахунок. Об'єкт дослідження в даній роботі, а саме гідротурбіна ПЛ15-ГК 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 використано «секторний» підхід, коли складні криволінійні елементи конструкції гідротурбіни замінюються секторами. Наприклад, направляючий апарат (НА), що має 24 лопатки, буде представлено одним сектором, що включає в себе одну лопатку; робоче колесо, що складається з 4 лопатей буде представлено одним сектором, що включає в себе лопать та міжлопатеві канали.

Загальне число елементів 6,4 млн: підвід – 3 млн; один міжлопатковий канал НА – 300 тис.; один міжлопатевий канал РК – 2 млн; відсмоктуюча труба (ВТ) – 1,1 млн.

Для якісного описання пограничного шару на стінках областей будувалися призматичні комірки (рис. 8).

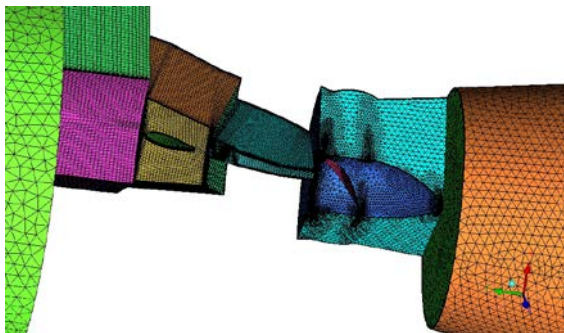


Рис. 8. Розрахункова сітка моделі

В роботі було проведено чисельний розрахунок тривимірного потоку в проточній частині капсульної гідротурбіни ПЛ15-ГК за допомогою програмного комплексу OpenFOAM. Граничні умови та математична модель були прийняті такі, як і в попередньому розрахунку по FlowVision.

На рис. 9–12 представлені результати даних досліджень, а саме візуалізація потоку у вигляді заливки.

**Розрахунок гідравлічних втрат в елементах проточної частини.** Сумарні втрати в підводі та відсмоктуючій трубі обчислювалися як різниця повної енергії на вході та виході, поділена на питому вагу.

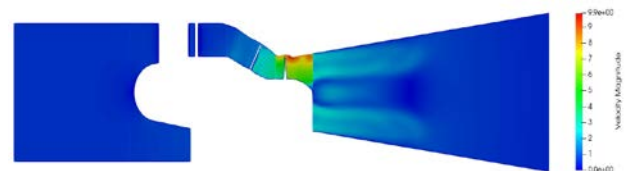


Рис. 9. Розподіл відносної швидкості в меридіональному перетині капсульної гідротурбіни

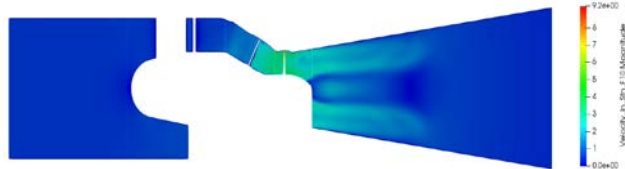


Рис. 10. Розподіл абсолютної швидкості в меридіональному перетині капсульної гідротурбіни



Рис. 11. Розподіл повного тиску в меридіональному перетині капсульної гідротурбіни

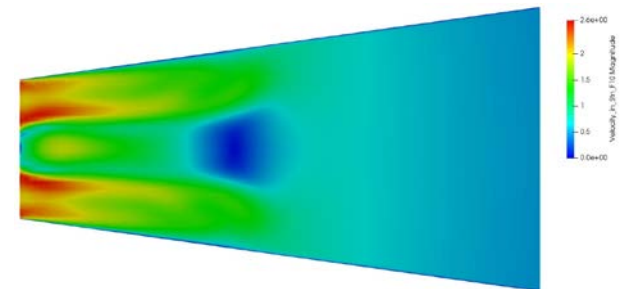


Рис. 12. Розподіл абсолютної швидкості в відсмоктуючій трубі капсульної гідротурбіни

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

Сумарні втрати в РК обчислювалися за формулою:

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

Гідравлічний ККД гідротурбіни ПЛ15ГК-100 визначався за формулою:

$$\eta_{\text{Г}} = \frac{N_{\text{еф}}}{\rho g Q H} = \frac{M\omega}{\rho g Q H},$$

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 ПЛ15-ГК-100, що отримані в результаті розрахунків у програмах FlowVision та OpenFoam.

Таблиця 1 – Гідрравлічні втрати в проточній частині

Елементи проточної частини	Програмні комплекси	
	FlowVision	OpenFoam
Підвід, %	1,8	1,3
Робоче колесо, %	3,1	3,5
Відсмоктуюча труба, %	2,3	2,2
Сумарні втрати в ПЧ, %	7,2	7,0

В табл. 2 представлено порівняння гідрравлічного ККД для оптимального режиму роботи гідротурбіни, розрахованого по двом програмним комплексам, з гідрравлічним ККД згідно універсальної характеристики ПЛ 15/984-ГК-46.

Таблиця 2 – Гідрравлічний ККД гідротурбіни ПЛ15-ГК-100

Програмні комплекси, модельна характеристика	Гідрравлічний ККД, %
FlowVision	92,8
OpenFoam	93,0
Універсальна характеристика ПЛ 15/984-ГК-46	92,5

#### Аналіз результатів чисельного дослідження.

Аналізуючи результати чисельного розрахунку потоку в ПЧ гідротурбіни ПЛ15-ГК можна виділити наступні моменти:

- течія в підводі рівномірна, без суттєвих відривів потоку (рис. 5–7, 9–11);

- обтікання колон статора та лопаток направляючого апарату проходить без суттєвих відривів потоку (рис. 5–7, 9–11);

- течія рідини в ВТ характеризується нерівномірністю значень швидкості (рис. 9–10, 12). Як видно з рис. 12 за обтікачем РК спостерігається незначне вихроутворення;

- отримані в результаті чисельного експерименту значення гідрравлічного ККД гідротурбіни для двох програмних комплексів адекватно співпадають з аналогічними значеннями експериментальних досліджень (універсальна характеристика ПЛ 15/984-ГК-46); розбіжність складає близько 0,5 %.

Як видно з рис. 5–7, 9–12, значення швидкостей потоку, тиску в характерних перетинах та характер їх розподілення, розраховані за допомогою FlowVision та OpenFoam фактично не відрізняються.

**Висновки.** 1. Аналіз проведеного чисельного дослідження дозволяє зробити висновок про подібність результатів розрахунку тривимірного потоку в проточних частинах гідротурбін в програмних комплексах FlowVision та OpenFoam. Таким чином, пакет з відкритим вихідним кодом OpenFOAM може бути успішно використаний в якості альтернативи комерційним пакетам програм обчислювальної гідродинаміки.

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

#### Список літератури

1. Потетенко О. В., Дранковський В. Е., Крупа Є. С. Чисельне дослідження просторового потоку в проточній частині капсульного гідроагрегату з допомогою програмного комплексу FlowVision. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2013. No. 14 (988). P. 72–78.
2. Барашков С. В. FlowVision – сучасний інженерний інструмент в дослідженні газодинамічних характеристик компресорів. *САПР і графіка.* 2005. С. 44–48.
3. Кочевский А. Н., Неня В. Г. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопатных гидромашинах. *Вісник Сумського державного університету: Сер.: Технічні науки.* Суми: СумДУ. 2003. № 13 (59). С. 195–210.
4. 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.
5. 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
6. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft".* 2008.
7. *OpenFOAM. The open source CFD toolbox.* URI: <http://www.openfoam.com> (дата звернення: 04.03.2020).
8. Крупа Є. С. Чисельне моделювання просторового потоку в підводі осової 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.
9. 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
10. 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
11. 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
12. Dehkharqani 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
13. Шевченко Н. Г., Шудрик А. Л., Радченко Л. П. Особенности численного моделирования течения вязкой жидкости в каналах погружных лопатных насосов низкой и средней быстроходности. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 45 (1154). P. 76–81.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. 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.
20. 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.
9. 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
10. 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
11. 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

#### References (transliterated)

1. Potetenko O. V., Drankovskyy V. E., Krupa Ye. S. Chysel'ne doslidzhennya prostorovoho potoku v protochniy chastyni kapsul'noho hidroahrehatu z dopomohoyu prohramnoho kompleksu FlowVision [Numerical study of the spatial flow in the flowing part of the capsule hydraulic unit using the software package FlowVision]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 14 (988), pp. 72–78.
2. Barashkov S. V. FlowVision – suchasniy inzhenerniy instrument v doslidzhenni gazodinamichnih harakteristik kompresoriv [FlowVision is a modern engineering tool in the study of gas-dynamic characteristics of compressors]. *SAPR I grafika*. 2005, pp. 44–48.
3. 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.
4. 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.
5. 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
6. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
7. *OpenFOAM. The open source CFD toolbox*. Available at: <http://www.openfoam.com> (accessed 04.03.2020).
8. 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.
12. 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, issue 10, pp. 1–10. doi: 10.1177/1687814017732893
13. Shevchenko N. G., Shudrik A. L., Radchenko L. R. Osobennosti chislennogo modelirovaniya techeniya vyazkoy zhidkosti v kanalah pogruzhnyih lopastnyih nasosov nizkoy i sredney byistrohodnosti [Features of numerical modeling flow of viscous liquid in channels of submersible bladed pumps of low and average rapidity]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015., no. 45 (1154), pp. 76–81.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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), pp. 1004–1012.

Надійшла (received) 05.04.2021

#### 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