

К. С. РЕЗВА, В. Е. ДРАНКОВСЬКИЙ, В. М. ШЕВЦОВ, Є. О. ОСПІЩЕВА

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ЧИСЕЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОНАПІРНОЇ ОБОРОТНОЇ ГІДРОМАШИНИ

Як впливає з Енергетичної програми України проектування та побудова гідроакмулюючих станцій є пріоритетним напрямком розвитку гідроенергетики України. Перспектива побудови Закарпатської ГАЕС потребує вирішення ряду питань дослідження та модернізації проточних частин високонапірних оборотних гідравлічних машин. У сучасних умовах роботи енергосистем гострою є проблема покриття пікових навантажень, що викликає необхідність приділяти більше уваги роботі оборотних гідромашин в турбінному режимі. При розробці проточних частин оборотних гідромашин широко використовуються математичні моделі опису робочого процесу, які ґрунтуються на різних ступенях його деталізації. В даній роботі розглядається опис робочого процесу на макро- та мікрорівнях, що дає можливість вирішувати комплекс задач в залежності від поставлених цілей. Результати чисельного розрахунку на макромоделях дозволяють проводити дослідження впливу геометрії окремих елементів проточної частини на гідродинамічні характеристики. У роботі, на першому етапі, застосований метод безрозмірних осереднених параметрів, який дозволяє на етапах проектування проточної частини нової оборотної гідравлічної машини або модернізації її вибрати оптимальну геометрію елементів проточної частини. Даний метод позитивно зарекомендував себе при чисельному дослідженні високонапірних оборотних гідравлічних машин на напори від 200 м до 500 м. При застосуванні даної математичної моделі – макрорівень, необхідно мати геометричні параметри лише в характерних перетинах проточної частини оборотної гідромашини. В ході роботи були досліджені три варіанти проточної частини високонапірної тихохідної оборотної гідромашини ОРО500-В-100. В результаті було визначено, яка геометрія елементів проточної частини значно впливає на гідродинамічні показники гідромашини. Було встановлено, що в підвідній частині (спіральної камери зі статором і направляючому апарату) найбільші значення гідравлічних втрат (до 65 % від загальних). Для другого та третього варіантів проточної частини були змінені параметри саме цих елементів. При зміні параметрів спіральної камери (збільшенні осередненого кута потоку на 10°) привело до збільшення гідравлічного ККД на 1,16 %. При зміні геометрії направляючого апарату – на 0,84 %. Для більш досконалого дослідження першого варіанта оборотної гідромашини було проведено чисельне дослідження на мікрорівні за допомогою програми CFD (OpenFOAM), що дозволило отримати розподіл тисків та швидкостей в проточній частині в турбінному режимі при оптимальних значеннях витрати та обертів. Порівняльний аналіз отриманих результатів за різними моделями з результатами фізичного експерименту показав задовільну збіжність, що свідчить про доцільність застосування обраних методів для дослідження високонапірних оборотних гідромашин.

Ключові слова: математична модель, оборотна гідромашина, проточна частина, втрати енергії, режимні параметри, оптимальний режим.

К. С. РЕЗВАЯ, В. Э. ДРАНКОВСКИЙ, В. М. ШЕВЦОВ, Е. А. ОСПИЩЕВА

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОНАПОРНОЙ ОБРАТИМОЙ ГИДРОМАШИНЫ

Как следует из Энергетической программы Украины проектирование и построение гидроаккумулирующих станций является приоритетным направлением развития гидроэнергетики Украины. Перспектива построения Закарпатской ГАЭС нуждается в решении ряда вопросов исследования и модернизации проточных частей высоконапорных оборотных гидравлических машин. В современных условиях работы энергосистем острой является проблема покрытия пиковых нагрузок, которая вызывает необходимость уделять больше внимания работе обратимых гидромашин в турбинном режиме. При разработке проточных частей обратимых гидромашин широко используются математические модели описания рабочего процесса, которые основываются на разных степенях его детализации. В данной работе рассматривается описание рабочего процесса на макро- и микроуровнях, что дает возможность решать комплекс задач в зависимости от поставленных целей. Результаты численного расчета на макромоделях позволяют проводить исследование влияния геометрии отдельных элементов проточной части на гидродинамические характеристики. В работе, на первом этапе, применен метод безразмерных осредненных параметров, который позволяет на этапах проектирования проточной части новой обратимой гидравлической машины или модернизации ее выбрать оптимальную геометрию элементов проточной части. Данный метод положительно зарекомендовал себя при численном исследовании высоконапорных обратимых гидравлических машин на напоры от 200 м до 500 м. При применении данной математической модели – макроуровень, необходимо иметь геометрические параметры лишь в характерных сечениях проточной части обратимой гидромашини. В ходе работы были исследованы три варианта проточной части высоконапорной тихоходной обратимой гидромашини ОРО500-В-100. В результате было определено, какая геометрия элементов проточной части значительно влияет на гидродинамические показатели гидромашини. Было установлено, что в подводной части (спиральной камеры со статором и направляющим аппарате) наибольшие значения гидравлических потерь (до 65 % от общих). Для второго и третьего вариантов проточной части были изменены именно эти элементы. При изменении параметров спиральной камеры (увеличении осредненного угла потока на 10°) привело к увеличению гидравлического КПД на 1,16 %. При изменении геометрии направляющего аппарата – на 0,84 %. Для более досконального исследования первого варианта обратимой гидромашини было проведено численное исследование на микроуровне с помощью программы CFD (OpenFOAM), что позволило получить распределение давлений и скоростей в проточной части в турбинном режиме при оптимальных значениях расходов и оборотов. Сравнительный анализ полученных результатов за разными моделями с результатами физического эксперимента показал удовлетворительную сходимость, которая свидетельствует о целесообразности применения избранных методов для исследования высоконапорных обратимых гидромашин.

Ключевые слова: математическая модель, обратимая гидромашина, проточная часть, потери энергии, режимные параметры, оптимальный режим.

К. REZVAYA, V. DRANKOVSKIY, V. SHEVTSOV, E. OSPICHEVA

THE APPLICATION OF METHODS OF MATHEMATICAL MODELING FOR THE NUMERICAL RESEARCH OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A HIGH-HEAD REVERSIBLE HYDRAULIC MACHINE

As follows from the Energy Program of Ukraine, the design and construction of pumped storage stations is a priority direction for the development of hydropower in Ukraine. The prospect of building the Zakarpatskay Power Storer Station requires a number of research issues and modernization of

© К. С. Резва, В. Е. Дранковський, В. М. Шевцов, Є. О. Оспіщева, 2020

the flow paths of high-pressure circulating hydraulic machines. In modern conditions of power systems operation, the problem of covering peak loads is an acute problem, which makes it necessary to pay more attention to the operation of reversible hydraulic machines in turbine mode. When developing the flow paths of reversible hydraulic machines, mathematical models for describing the working process are widely used, which are based on different degrees of its detailing. In this paper, a description of the workflow at the macro and micro levels is considered, which makes it possible to solve a set of tasks depending on the goals set. The results of numerical calculations on macromodels make it possible to study the influence of the geometry of individual elements of the flow path on the hydrodynamic characteristics. In the work, at the first stage, the method of dimensionless averaged parameters was applied, which allows at the stages of designing the flow path of a new reversible hydraulic machine or its modernization to select the optimal geometry of the flow path elements. This method has positively proved itself in the numerical study of high-pressure reversible hydraulic machines for heads from 200 m to 500 m. When using this mathematical model – the macro level, it is necessary to have geometric parameters only in the characteristic sections of the flow path of the reversible hydraulic machine. In the course of the work, three variants of the flow path of a high-pressure low-speed reversible hydraulic machine ORO500-V-100 were investigated. As a result, it was determined which geometry of the flow path elements significantly affects the hydrodynamic performance of the hydraulic machine. It was found that in the inlet part (spiral chamber with stator and guide vanes) the highest values of hydraulic losses (up to 65 % of the total). For the second and third variants of the flow path, these elements were changed. Changing the parameters of the spiral chamber (increasing the averaged flow angle by 10°) led to an increase in the hydraulic efficiency by 1,16 %. With a change in the geometry of the guide vane – by 0,84 %. For a more detailed study of the first version of a reversible hydraulic machine, a numerical study was carried out at the micro level using the program CFD (OpenFOAM), which made it possible to obtain the distribution of pressures and speeds in the flow path in a turbine mode at optimal values of discharger and revolutions. A comparative analysis of the results obtained for different models with the results of a physical experiment showed satisfactory convergence, which indicates the expediency of using the selected methods for the study of high-pressure reversible hydraulic machines.

Keywords: mathematical model, reversible hydraulic machine, flow path, energy losses, operating parameters, optimal mode.

Вступ. Питання розробки та дослідження проточних частин високонапірних оборотних гідромашин актуальні і вимагають обговорень в науковому середовищі для обґрунтування можливості залучення як інвестицій, так і спеціалізованих підприємств для розробки гідромашинного устаткування з високими енергокавітаційними показниками.

У сучасних умовах роботи енергосистем гострою є проблема покриття пікових навантажень, що викликає необхідність приділяти більше уваги роботі оборотних гідромашин в турбінному режимі [1–3].

Для сучасного підходу до проектування проточних частин гідроагрегатів ГАЕС необхідним є багатоваріантний аналіз, в процесі якого досліджується не лише вплив режимних параметрів на енергетичні показники, але і гідродинамічних параметрів окремих елементів проточної частини.

В даний час існують різні методи і підходи до дослідження робочого процесу в оборотних гідравлічних машинах. При цьому вибір найбільш ефективного залежить від стадії проектування і від завдання, яке стоїть перед проектувальниками.

Взаємодія різних математичних моделей опису робочого процесу, як на макро- та мікрорівнях (тобто вживання блоково-ієрархічного підходу), ефективно на різних стадіях проектування гідравлічних машин [4–8].

Одною з математичних моделей, яка застосовується на початкових стадіях, є модель, заснована на безрозмірних осереднених параметрах – макрорівень [9–12].

У даній роботі був застосований метод безрозмірних осереднених параметрів для розрахункового дослідження характеристик високонапірної оборотної гідромашини на напір 500 м з отриманням параметрів просторового потоку в підвідній частині – мікрорівень [13–21].

Основна частина. Застосування методу безрозмірних осереднених параметрів для дослідження в проточній частині дозволяє визначити осереднені кінематичні і енергетичні характеристики в характерних перетинах. У загальному випадку для перевірки розрахунків параметрів вибираються наступні характерні перетини (рис. 1):

- 0-0 – на виході з напрямного апарату,
- 1-1 – на вході в робоче колесо,
- 2-2 – на виході з робочого колеса,
- 3-3 – на вході в відсмоктуючу трубу.

Для проведення розрахунків при визначенні кінематичних параметрів потоку в спіральній камері зі статором необхідно мати дані кута закрутки потоку, який залежить від геометричних параметрів проточної частини: кут обхвату спіралі в плані $\varphi_{сп}$, радіус вхідного перетину спіралі ρ_1 , зовнішній радіус спіралі R , висота напрямного апарату $b_{на}$. Кінематичні і енергетичні параметри в характерних перетинах можуть бути визначені при відомих режимних параметрах (ω , Q , a_0); кінематичних характеристиках направляючого апарату (осереднений кут потоку a_0 , розподіл кутів потоку по висоті лопатки направляючого апарату); геометричних параметрів проточної частини (b_0 , $z_{на}$, D_0), контури вхідної і вихідної кромки в меридіональній проекції, геометричні кути лопаті на вхідній і вихідній кромках; геометричні характеристики меридіонального потоку в точках перетину ліній струму з характерними перетинами, кут між меридіональною складовою швидкості і нормаллю до перетину δ , кут між дотичною до лінії струму і віссю турбіни γ . Таким чином, при зміні геометричних параметрів на ранніх стадіях можливо прорахувати різні варіанти проточної частини для вибору більш оптимального з заданими енергетичними та кінематичними параметрами.

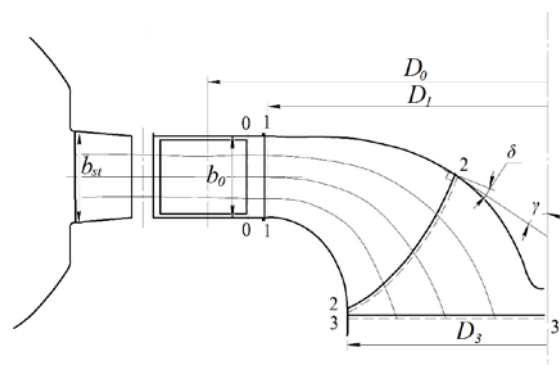


Рис. 1. Характерні перетини проточної частини оборотної гідромашини в турбінному режимі роботи

Для розрахункового дослідження впливу геометричних параметрів на характеристики проточної частини оборотної гідромашини необхідним є вибір коректної математичної моделі і прийнятих коефіцієнтів втрат, які дозволяють описати робочий процес енергетичної взаємодії потоку з елементами проточної частини. Так для опису робочого процесу на мікрорівні необхідно мати твердотільну модель елементів проточної частини (рис. 2–4). Вибрана модель робочого процесу на макрорівні добре зарекомендувала себе при розрахунках оборотних гідравлічних машин на напори від 200 м до 500 м [8].

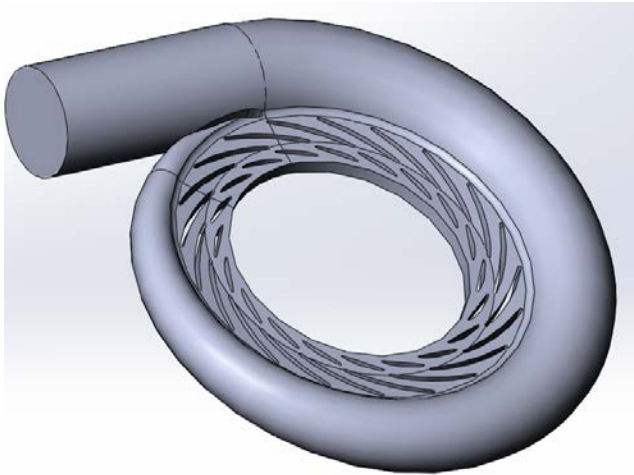


Рис. 2. Просторова модель потоку підвідної частини оборотної гідромашини в турбінному режимі

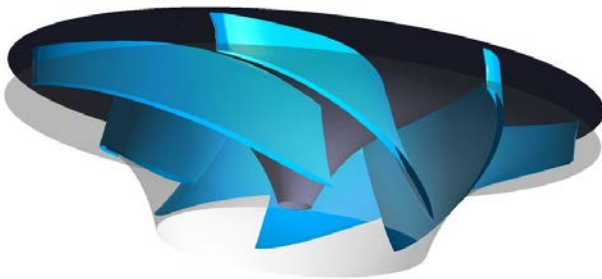


Рис. 3. 3D-модель робочого колеса оборотної гідромашини

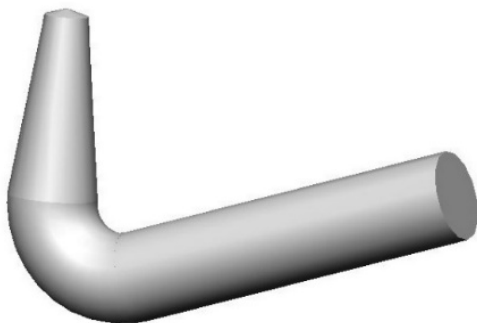


Рис. 4. Просторова модель потоку в відсмоктуючій трубі оборотної гідромашини

У першому варіанті проточної частини спіральна камера з круглими меридіональними перетинами, яка розрахована згідно із законом $V_u \cdot r = \text{const}$ з кутом охопту $\varphi_{\text{сп}} = 360^\circ$. Розрахунковий кут спіралі $\alpha_{\text{сп}} = 27^\circ$. Швидкість у вхідному перетині визначалася по витраті в розрахунковому турбінному режимі роботи. Діаметр вхідного перетину спіральної камери $D_{\text{вх}} = 0,484D_1$, густина решітки статору $l/t = 1,48$. Кількість колон статору – 20. Діаметр статору на вході $D_{\text{вх ст}} = 1,56D_1$, на виході – $D_{\text{вих ст}} = 1,31D_1$. Висота статору – $b_{\text{ст}} = 0,0943D_1$. Геометричні параметри направляючого апарату: кількість лопаток $z_{\text{на}} = 20$, густина решітки $l/t = 1,07$, діаметр $D_0 = 1,198D_1$, висота – $b_{\text{на}} = 0,0674D_1$. Параметри робочого колеса: діаметр $D_1 = 1$ м, відношення діаметра на вході в робоче колесо і на виході з робочого колеса 0,5 (вихід-вхід), кількість лопатей $z_{\text{рк}} = 6$. Відсмоктуюча труба складається з конічного патрубка, коліна і циліндрового патрубка. Параметри відсмоктуючої труби: діаметр на вході $D_{\text{от вх}} = 0,5D_1$, діаметр на виході $D_{\text{от вих}} = D_1$, довжина $l_{\text{вт}} = 5D_1$.

У другому варіанті проточної частини зроблена заміна спіральної камери першого варіанта на другий варіант з наступними параметрами: розрахунковий кут спіралі збільшений до 37° . Діаметр вхідного перерізу спіральної камери $D_{\text{вх}} = 0,59D_1$, густина решітки статору зменшилась – $l/t = 0,897$. Кількість колон статору зменшено до 16. Діаметр статору на вході збільшений до $1,6D_1$, на виході залишився незмінним. Висота статору – без змін. Всі інші елементи (направляючий апарат, робоче колесо та відсмоктуюча труба) залишилися з тими ж геометричними параметрами, як в першому варіанті проточної частини.

У третьому варіанті був взятий другий варіант за основу та зроблені змінення геометрії направляючого апарату: кількість лопаток 16, діаметр збільшений до $D_0 = 1,25D_1$.

Результати дослідження. В результаті проведених розрахунків трьох варіантів проточної частини були отримані наступні результати: визначені параметри оптимального режиму роботи гідромашини, обчислені втрати в елементах проточної частини, розраховані гідравлічний ККД, кути потоку перед і за робочим колесом. Дані параметри необхідні для визначення більш відповідних гідродинамічних параметрів елементів проточної частини.

В табл. 1 наведені параметри оптимального режиму.

Таблиця 1 – Параметри оптимального режиму

Варіанти	n' , об/хв	Q' , м ³ /с	η , %
1	80	0,147	87,3
2	77	0,156	88,5
3	79	0,150	89,3

Одним з основних параметрів, який характеризує роботу оборотної гідравлічної машини, є гідравлічний

ККД. Поверхні ККД обрахованих варіантів представлені на рис. 5–7. Це дає можливість наочніше представити характер зміни втрат в проточній частині.

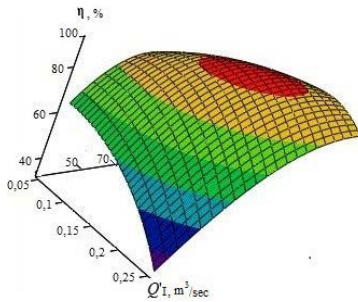


Рис. 5. Поверхня гідравлічного ККД оборотної гідромашини ОРО500-В-100 (1 варіант)

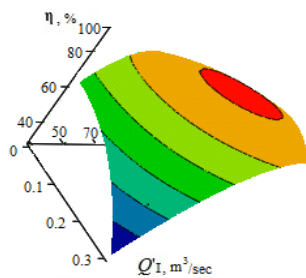


Рис. 6. Поверхня гідравлічного ККД оборотної гідромашини ОРО500-В-100 (2 варіант)

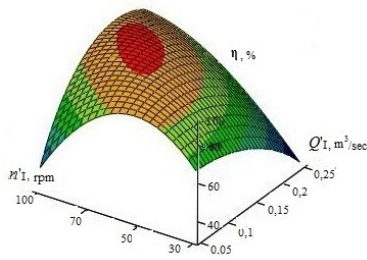


Рис. 7. Поверхня гідравлічного ККД оборотної гідромашини ОРО500-В-100 (3 варіант)

Графіки втрат в елементах проточної частини дають можливість проаналізувати баланс втрат і що необхідно змінити для поліпшення гідродинамічних параметрів оборотної гідромашини. Для цього були побудовані графіки при оптимальних значеннях n'_1 та Q'_1 трьох варіантів проточної частини оборотної гідромашини, дані для яких були отримані розрахунковим методом на математичній моделі осереднених безрозмірних параметрів (рис. 8).

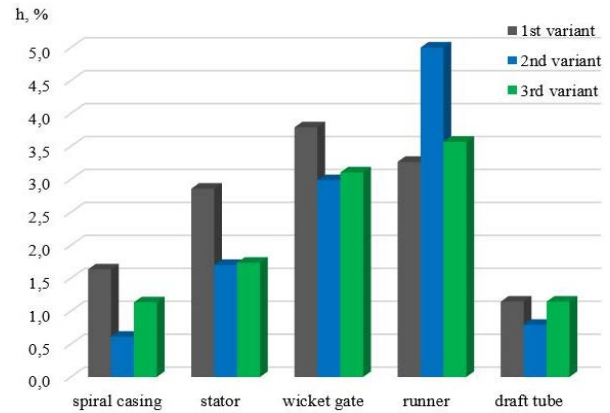


Рис. 8. Потери в елементах проточної частини трьох варіантів проточної частини

З графіка видно, що в елементах підводу найбільші втрати. Унаслідок змін геометрії даних елементів втрати значно зменшилися відносно першого варіанту.

Для перевірки коректності отриманих результатів на підставі вибраного методу були так само проведені експериментальні дослідження трьох варіантів проточних частин оборотної гідромашини на кафедрі «Гідравлічні машини» НТУ «ХПІ» на гідродинамічному стенді.

Універсальна характеристика трьох варіантів проточної частини, яка представлена на рис. 9, показує характер зміни параметрів і оптимуму на ній.

Після дослідження першого варіанту проточної частини оборотної гідромашини була отримана універсальна характеристика (рис. 9, лінії чорного кольору).

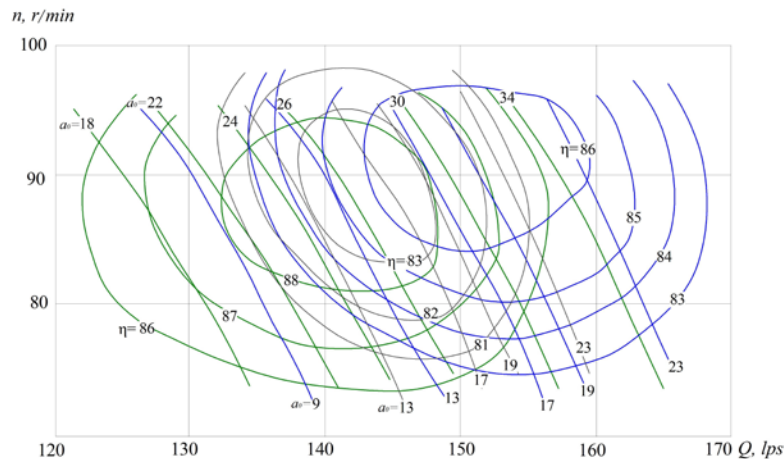


Рис. 9. Порівняння варіантів універсальних характеристик ОРО500-В-100

Далі були проведені зміни першого варіанту. Результати експериментальних досліджень показали, що універсальна характеристика деформована і змінені режимні параметри роботи гідромашини в порівнянні з першим варіантом. Оптимум характеристики при цьому сформувався на декілька великих приведених витратах і оборотах (рис. 9, лінії зеленого кольору).

Результати дослідження третього варіанту проточної частини показали, що параметри оптимального режиму роботи оборотної гідромашини змінені в кращу сторону: число приведених оборотів зменшилося і приведена витрата також зменшилася на 3,4 % (з 147 до 142 л/с), що краще для агрегату з даним напором (рис. 9, лінії синього кольору).

Параметри оптимальних режимів роботи агрегата наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри оптимального режиму моделі

Варіанти	n'_1 , об/хв	Q'_1 , м ³ /с	η , %
1	89	0,145	83,6
2	92	0,147	86,7
3	88	0,142	88,8

Для твердотільної моделі першого варіанта проточної частини були виконані чисельні розрахунки просторової течії за допомогою програми CFD (OpenFOAM) – мікрорівень математичного моделювання. На рис. 10–11 наведені розподіл статичного тиску та абсолютної швидкості в площині середньої лінії напрямного апарату нормальної до осі гідромашини для параметрів оптимального режиму.

В ході розрахунку було встановлено, що в проточній частині тихохідної оборотної гідравлічної машини найбільші втрати енергії спостерігаються в частині, що підводить (60–65 %) [9]. Тому після розрахунку першого варіанту була змінена геометрія спіральної камери зі статором. В результаті цього було зменшено втрати на 1,16 % за рахунок зменшення втрат в спіральній камері (1,02 %), статорі (1,16 %) і направляючому апараті. Але у зв'язку з неповним узгодженням елементів підведення і лопатевої системи збільшились втрати в робочому колесі на 2,17 %. Внаслідок цього гідравлічний ККД і, відповідно, повний ККД збільшився тільки на 1,16 %.

Далі було змінено і геометрію направляючого апарату, що привело до наступного: трохи збільшились втрати в елементах підведення (сумарне збільшення – 0,67 %), але при цьому втрати в робочому колесі зменшилися на 2,17 %. В результаті узгодження елементів підведення і лопатевої системи удалось збільшити ККД на 0,84 %.

Якщо порівнювати останній варіант проточної частини з початковим (першим варіантом), то у результаті вдалося підвищити ККД на 2 %.

Висновки: Вживання методу безрозмірних осереднених параметрів для дослідження проточних частин оборотних гідромашин в турбінному режимі роботи показало необхідність узгодження

геометричних параметрів елементів проточної частини, яке впливає на її гідродинамічні, енергетичні і кінематичні параметри.

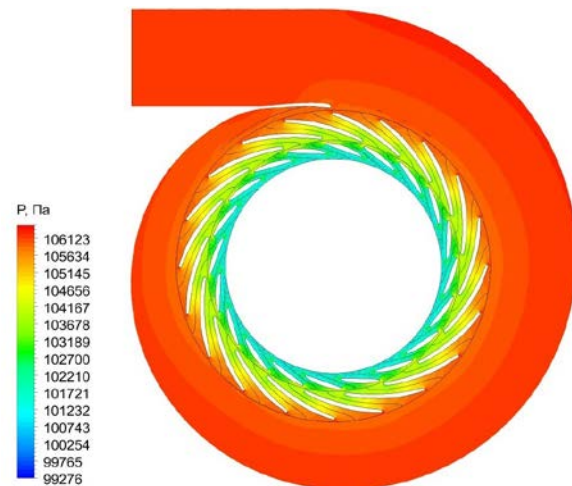


Рис. 9. Розподіл статичного тиску в проточній частині першого варіанту

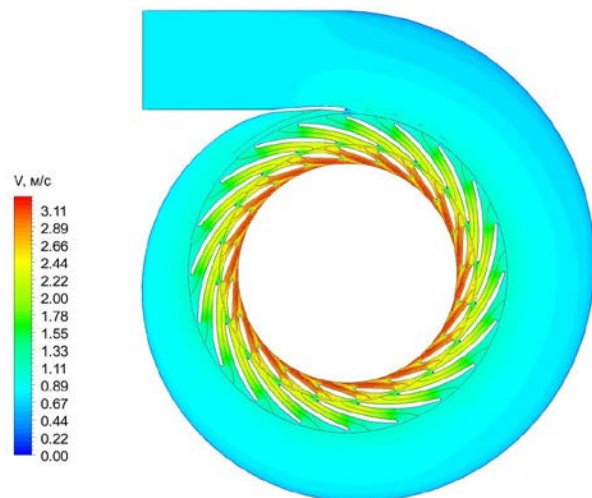


Рис. 10. Розподіл абсолютної швидкості в проточній частині першого варіанту

За допомогою методу осереднених безрозмірних параметрів визначаються кути потоку β_1 та α_2 , які дають інформацію про обтікання лопатевої системи робочого колеса і про узгодження елементів проточної частини оборотної гідромашини.

У тихохідній оборотній гідромашині найбільші втрати в підвідній частині (60–62 % від загальних). Таким чином, для підвищення енергетичних показників необхідним є модифікація (зміна геометрії) саме елементів підводу (спіральної камери, статора і направляючого апарату).

В результаті розрахунків було визначено, що зміна геометричних параметрів спіральної камери та статора привело до зменшення втрат на 1,16 %, а при зміні геометрії направляючого апарату – 0,84 %.

Отримані результати дослідження просторового потоку в проточній частині першого варіанту оборотної гідромашини дозволили цілеспрямовано

провести зміни в геометрії другого та третього варіантів підвідної частини.

Список літератури

- Ландау Ю. А. Основные тенденции развития гидроэнергетики Украины. *Научные работы*. Харьков. 2014. Т. 53, вып. 40. С. 82–86.
- Кучерява І. М., Сорокіна Н. Л. Шляхи регулювання графіків навантаження та управління споживанням електричної енергії. *Гідроенергетика України*. 2007. № 4. С. 36–44.
- Sokol Ye., Cherkashenko M., Drankovskiy V. Control and energy models of reversible hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No. 2. P. 4–11. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.01
- Колычев В. А., Миронов К. А., Тыньянова И. И. Расчет и анализ баланса потерь энергии в высоконапорной радиально-осевой гидравлической турбине. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2005. № 1/2 (13). С. 95–106.
- Колычев В. А., Миронов К. А., Тыньянова И. И. Общие закономерности рабочего процесса и их применение для расчета и анализа энергетических характеристик гидротурбин. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2006. № 4/3 (22). С. 54–64.
- Колычев В. А., Дранковский В. Э., Мараховский М. Б. *Расчет гидродинамических характеристик направляющих аппаратов гидротурбины*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. 216 с.
- Колычев В. А., Дранковский В. Э., Миронов К. А., Тыньянова И. И. Моделирование кинематических характеристик потока в радиально-осевой гидротурбине при проектировании ее проточной части. *Вісник Сумського державного університету. Сер.: Технічні науки*. Суми: СумДУ. 2003. № 13 (59). С. 124–131.
- Дранковский В. Э., Резвая К. С. К расчету гидродинамических характеристик высоконапорной обратной гидромашин в турбинном режиме работы на основе математического описания ее рабочего процесса. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 3. P. 125–129.
- Дранковский В. Э., Хавренко М. Ю. Определение расчетных параметров высоконапорных обратимых гидромашин. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 81–84.
- Мараховский М. Б., Гасюк А. И. Математическая модель гидродинамических характеристик элементов проточной части радиально-осевой гидротурбины. Часть 2. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2018. No. 46 (1322). P. 49–53.
- Hasmatuchi V. *Hydrodynamics of a pump-turbine operating at off-design conditions in generating mode*. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne, 2012. 168 p.
- Дедков В. Н. Определение расчетных параметров обратимых гидромашин для диапазона напоров $H = 70\text{--}700$ м. *Проблемы машиностроения*. 2008. Т. 11, № 1. С. 7–11.
- 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.
- Khorev O. Numerical study of fluid flow in a spiral chamber of a radial-axial hydraulic machine. *East European Journal of Advanced Technology*. 2013. No. 1/8. P. 41–45.
- Yang Wei, Xiao Ruofu. Multiobjective Optimization Design of a Pump-Turbine Impeller Based on an Inverse Design Using a Combination Optimization Strategy. *Journal of Fluids Engineering*. 2014. Vol. 136. P. 014501-1–014501-9.
- Сухоребрий П. Н., Коваль С. А., Неня В. Г., Кочевский А. Н. Определение структуры потока в спиральной камере радиально-осевой обратной гидромашин на основе численного моделирования течения жидкости. *Проблемы машиностроения*. 2010. Т. 13, № 1. С. 31–41.
- Pilev I., Rigin V., Sonin V., Semenova A., Skorospelov V., Chirkov D., Astrakova A. Experience in optimization design of turbine water passages shapes. *Proc. of Hydro 2014 (13–15 October 2014, Cernobbio)*. Cernobbio, 2014. 8 p.
- 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.
- Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
- 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
- Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Makarov V. Optimization of the water passage of a pump-turbine based on a numerical study of its hydrodynamic characteristics. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, 2019. P. 460–463.

References (transliterated)

- Landau Yu. A. Osnovnye tendentsii razvitiya gidroenergetiki Ukrainy [The main trends in the development of hydropower in Ukraine]. *Nauchnye raboty*. Kharkov. 2014, vol. 53, issue 40, pp. 82–86.
- Kucheryava I. M., Sorokina N. L. Shlyakhy rehulyuvannya hrafykyk navantazhennya ta upravlinnya spozhyvannyam elektrychnoy enerhiyi [Ways of adjusting load schedules and controlling the consumption of electric energy]. *Hidroenerhetyka Ukrayiny*. 2007, no. 4, pp. 36–44.
- Sokol Ye., Cherkashenko M., Drankovskiy V. Control and energy models of reversible hydraulic machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 2, pp. 4–11. doi: 10.20998/2411-3441.2019.2.01
- Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Raschet i analiz balansu poter' energii v vysokonapornoy radial'no-osevoy gidravlicheskoj turbine [Calculation and analysis of the energy loss balance in a high-head Francis hydroturbine]. *Skhidno-Yevropejs'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2005, no. 1/2 (13), pp. 95–106.
- Kolychev V. A., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Obshchie zakonemernosti rabocheho protsessu i ikh primenenie dlya rascheta i analiza energeticheskikh kharakteristik gidroturbin [General regularities of the working process and their application for the calculation and analysis of the energy characteristics of hydroturbines]. *Skhidno-Yevropejs'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 2006, no. 4/3 (22), pp. 54–64.
- Kolychev V. A., Drankovskiy V. E., Marakhovskiy M. B. *Raschet gidrodinamicheskikh kharakteristik napravlyayushchikh apparatov gidroturbiny* [Calculation of the hydrodynamic characteristics of the wicket gate of the hydraulic turbine]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2002. 216 p.
- Kolychev V. A., Drankovskiy V. E., Mironov K. A., Tyn'yanova I. I. Modelirovanie kinematcheskikh kharakteristik potoka v radial'no-osevoy gidroturbine pri proektirovanii ee protchnoy chasti [Modeling of the kinematic characteristics of the flow in a Francis hydraulic turbine during designing its water passage]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin: Technical Sciences Series]. Sumy, SumDU Publ., 2003, no. 13 (59), pp. 124–131.
- Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S. K raschetu gidrodinamicheskikh kharakteristik vysokonapornoy obratimoy gidromashiny v turbinnom rezhime raboty na osnove matematicheskogo opisaniya ee rabocheho protsessu [To the calculation of the hydrodynamic characteristics of a high-head reversible hydraulic machine in a turbine mode of operation based on a mathematical description of its operation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 3, pp. 125–129.
- Drankovskiy V. E., Khavrenko M. Yu. Opredelenie raschetnykh parametrov vysokonapornykh obratimykh gidromashin [Determination of design parameters of high-pressure reversible hydraulic machines]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 20 (1192), pp. 81–84.

10. Marakhovskiy M. B., Gasyuk A. I. Matematicheskaya model' gidrodinamicheskikh kharakteristik elementov protochnoy chasti radial'no-osevoy gidroturbiny. Chast' 2 [Mathematical model of hydrodynamic characteristics of the elements of the flow part of the radial-axial hydraulic turbine. Part 2]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 46 (1322), pp. 49–53.
11. Hasmatuchi V. *Hydrodynamics of a pump-turbine operating at off-design conditions in generating mode*. Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne Publ., 2012. 168 p.
12. Dedkov V. N. Opredelenie raschetnykh parametrov obratimyykh gidromashin dlya diapazona naporov $N = 70\text{--}700$ m [Determination of the design parameters of reversible hydraulic machines for the range of head $H = 70\text{--}700$ m]. *Problemy mashinostroeniya*. 2008, vol. 11, no. 1, pp. 7–11.
13. 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.
14. Khorev O. Numerical study of fluid flow in a spiral chamber of a radial-axial hydraulic machine. *East European Journal of Advanced Technology*. 2013, no. 1/8, pp. 41–45.
15. Yang Wei, Xiao Ruofu. Multiobjective Optimization Design of a Pump-Turbine Impeller Based on an Inverse Design Using a Combination Optimization Strategy. *Journal of Fluids Engineering*. 2014, vol. 136, pp. 014501-1–014501-9.
16. Sukhorebryu P. N., Koval' S. A., Nenya V. G., Kochevskiy A. N. Opredelenie struktury potoka v spiral'noy kamere radial'no-osevoy obratimoy gidromashiny na osnove chislennogo modelirovaniya techeniya zhidkosti [Determination of the flow structure in a spiral chamber of a radially axial reversible hydraulic machine based on numerical simulation of fluid flow]. *Problemy mashinostroeniya*. 2010, vol. 13, no. 1, pp. 31–41.
17. Pilev I., Rigin V., Sonin V., Semenova A., Skorospelov V., Chirkov D., Astrakova A. Experience in optimization design of turbine water passages shapes. *Proc. of Hydro 2014 (13–15 October 2014, Cernobbio)*. Cernobbio, 2014. 8 p.
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. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
20. 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" Publ., 2017, no. 7 (1229), pp. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
21. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Makarov V. Optimization of the water passage of a pump-turbine based on a numerical study of its hydrodynamic characteristics. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, 2019, pp. 460–463.

Надійшла (received) 28.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Резва Ксенія Сергіївна (Rezvaia Kseniya Sergeevna, Rezvaya Kseniya) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2457-0097>; e-mail: rezvayaks@gmail.com

Дранковський Віктор Едуардович (Drankovskiy Viktor Eduardovich, Drankovskiy Viktor) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9011-2094>; e-mail: drankovskiy50@ukr.net

Шевцов Вадим Михайлович (Shevtsov Vadim) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5115-4398>; e-mail: vadym.shevtsov@khp.edu.ua

Оспіщева Лізавета Олександрівна (Ospicheva Elizaveta Aleksandrovna, Ospicheva Lizaveta) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2854-2667>; e-mail: ospischeva.liza@gmail.com