

К. А. МИРОНОВ, Ю. Ю. ОЛЕКСЕНКО, Д. Ю. БОНДАРЕНКО

ВИКОРИСТАННЯ CFD ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СПІРАЛЬНОЇ КАМЕРИ ТА КОЛОН СТАТОРА ВИСОКОНАПІРНОЇ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ГІДРОТУРБИНИ

На основі результатів *CFD* аналізується гідравлічний розрахунок підводу радіально-осьової гідротурбіни: спіральної камери, статорного кільця та колон статора. Розрахунок спроектованої спіральної камери високонапірної радіально-осьової гідротурбіни здійснюється на підставі припущення про симетричний потік потенційної осі. З метою зменшення гідравлічних втрат було обрано кут охоплення спіралі 360° , згідно до рекомендацій для високонапірних турбін. Було обране статорне кільце розтрубного типу для кращого розподілу води. Спроектвані спіральна камера, статорне кільце і колони статора аналізуються та перевіряються за допомогою *CFD* при різних витратах води та масових витратах, як індивідуально так і з усією проточною частиною турбіни. Припущення щодо збереження моменту імпульсу або потенційного потоку перевіряється за допомогою *CFD*.

Ключові слова: спіральна камера, статорне кільце, колони статора, *CFD*, кут охоплення, розтруб, зуб, ККД.

На основе результатов *CFD* анализируется гидравлический расчет подвода радиально-осевой гидротурбины: спиральной камеры, статорного кольца и колон статора. Расчет спроектированной спиральной камеры высоконапорной радиально-осевой гидротурбины осуществляется на основании предположения про симметричный поток потенциальной оси. С целью уменьшения гидравлических потерь угол охвата спирали был принят 360° , согласно рекомендациям для высоконапорных турбин. Статорное кольцо было выбрано раструбного типа для лучшего распределения воды. Спроектированные спиральная камера, статорное кольцо и колонны статора анализируются и проверяются с помощью *CFD* для различных открытий направляющего аппарата и массовых расходов, как индивидуально, так и со всей проточной частью турбины. Предположения относительно сохранения момента импульса или потенциального потока проверяется с помощью *CFD*.

Ключевые слова: спиральная камера, статорное кольцо, колонны статора, *CFD*, угол охвата, раструб, зуб, КПД.

Spiral casing of a hydraulic turbine is a very important part for the uniform distribution of the kinetic energy of water along the periphery of the guide vanes and runner. It guides the water at optimum angle from the spiral casing and the stay ring through the guide vanes into the runner to provide an appropriate response between the entire water flow and the runner. The stay ring of the spiral casing is responsible for its mechanical strength and provides water through the stay vanes. The article analyzes the hydraulic calculation of a spiral casing, a stay ring and stay vanes. Verification of hydraulic calculation is carried out by developing a spiral casing of a high-pressure Francis turbine based on the assumption of a symmetric flow of the potential axis. The angle of the spiral is 360° , which is more profitable for high-pressure turbines to reduce losses. Stay ring for better distribution of water. Designed spiral casing, stay ring and stay vanes are analyzed and tested using *CFD* for various guide vane openings and mass flow rates, both individually and with the entire turbine system. The assumption for the conservation of the angular momentum or potential flow is verified using *CFD*.

Keywords: spiral casing, stay ring, stay vanes, *CFD*, nose angle, bell mouth, nose, efficiency.

Вступ. Спіральна камера (СК) є дуже важливою частиною проточної тракту гідравлічної турбіни (ГТ), вона застосовується для рівномірного розподілу кінетичної енергії води по периферії лопаток напрямного апарату (НА) і лопатей робочого колеса (РК). НА спрямовує воду під оптимальним кутом на РК, щоб забезпечити відповідну реакцію між усім потоком води, який проходить підвідну частину ГТ та РК. Статорне кільце СК відповідає за її механічну міцність та забезпечує прохід води через колони статора.

СК є компонентом ГТ, яка з'єднується з верхнім б'єфом через напірний трубопровід. Вона складається зі спірального корпусу, що має равликподібну природу і комплект статорних кілець, в якому колони статора з'єднані двома статорними кільцями. Статична енергія води, що надходить з верхнього б'єфу, перетворюється в кінетичну енергію в напірному трубопроводі. Осьова складова цієї кінетичної енергії поступово зменшується в СК і одночасно збільшується радіальна та окружна складові. Ці перетворення енергії створюють необхідний вплив на РК і в кінцевому підсумку, створюють необхідний обертовий момент на валу РК.

СК призначена для забезпечення рівномірного вісесиметричного підводу води до НА за умови мінімальних гідравлічних втрат у спіральному каналі, статорі та НА.

Статор турбіни призначений для передачі осьових зусиль гідрогенератора, бетонного масиву й допоміжного устаткування на фундамент будівлі станції. Статор – основна конструктивна деталь, що поєднує всі вузли гідротурбіни. Крізь колони статора проходить потік води, який формується СК. Наявність колон статора в потоці приводить до деяких втрат енергії за рахунок тертя й за рахунок частини профільних втрат, що залежать від умов обтікання колон і, зокрема, від розташування колон стосовно потоку, що набігає. Питома вага втрат у зоні статорних колон, через відносно невелику хорду їхніх профілів і невеликих значень швидкостей у зоні розташування колон, становить незначну величину стосовно енергетичного балансу турбіни в цілому.

У гідротурбінах НА потрібен для:

- регулювання режиму роботи турбіни (Q і n);
- створення необхідної циркуляції перед робочим колесом відповідно до навантаження на агрегат;
- припинення доступу води до робочого колеса при повному закритті направляючого апарату;
- зупинки турбіни;
- захисту агрегату від розгону при скиданні навантаження.

СК має різні види поперечних перетинів, такі як круглі, прямокутні, еліптичні, трапецієподібні тощо. Для високонапірних ГТ застосовують металеву СК з кутом обхвату ϕ в діапазоні $315^\circ \div 360^\circ$ [1].

Звичайна конструкція СК має круглі поперечні перерізи. Вона включає в себе нероздільний комплект статорного кільця з колонами статора, кожне статорне кільце прямокутного перерізу.

Традиційна концепція еліптичних поперечних перетинів для СК разом із статорним кільцем розтрубного типу розглядається у даній статті та порівнюється зі звичайною конструкцією СК з комплектом статорного кільця. Дана стаття аналізує два поперечні перетини СК, еліптичної та круглої будови, призначені для високонапірної радіально-осьової (РО) ГТ в умовах гідравлічної конструкції і включає в себе відносний висновок та порівняння різних параметрів за допомогою *CFD* [2]. Одночасно дві конфігурації статорного кільця для обох перетинів включені до інтервалу аналізу.

1. Методика проектування. Методика проектування – це комбінація гідравлічної конструкції СК та механічної конструкції комплексу статорного кільця. Після аналізу та вивчення, з багатьох вхідних даних, лише наступні головні вхідні параметри, наведені у табл. 1, скорочуються [3].

Таблиця 1 – Вхідні параметри

H	напір в м
Q_r	витрата в м ³ /с
D	діаметр робочого колеса в м
N	кількість інтервалів колон статора
θ_2	кут нахилу

1.1. Спіральна камера. Конструкція базується на припущенні симетричного потоку потенційної осі, тобто вибір розподілу швидкості вздовж СК може бути різним [1], у статті буде розглянуто СК спроектовану по закону:

$$V_u \cdot r = const \quad (1)$$

де V_u – окружна складова.

Кут обхвату φ для СК приймається 360°, що рекомендується для високонапірних РО ГТ, щоб уникнути гідравлічних нерівномірностей при вході у НА [1–3].

Відстань від центральної лінії РК та діаметрів на відповідних відстанях нанесено з відповідними кутами [4]. В ідеалі характер двох кривих повинен бути лінійним, але в області обхвату він показує відхилення від припущення про потенційний потік. Точні розміри в області зубу можуть бути передбачені многочленом шостого порядку. У регіоні, розташованому далеко від зубу, многочлен набагато ближчий до лінійного приближення.

Для точного порівняння використовуються однакові розміри для обох поперечних перетинів [5]. Для еліптичних перетинів значення діаметра беруться як менший діаметр еліпса, а для круглих перетинів – діаметри окружності на окремих ділянках. Діаметр вхідного перерізу, а отже, площа входу однакова для обох конфігурацій, що підтверджує ту саму масову витрату потоку для кожної конфігурації [6].

Вхідний переріз майже круглий для кожної конфігурації, і має однаковий основний і менший діаметр, як показано на рис. 1. Еліптичний переріз переважно видно у напрямку спіралі або до зубу.

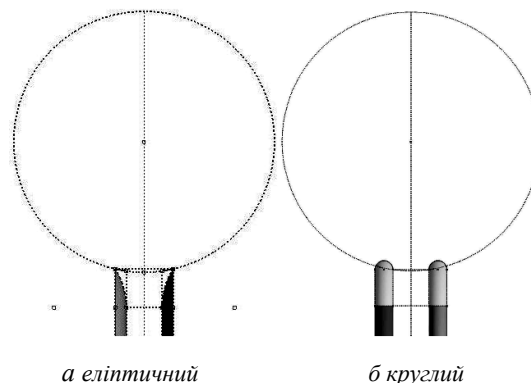


Рис. 1 – Конфігурація поперечних перетинів статорного кільця

1.2 Статорне кільце. На рис. 1 показані види в перерізі статорного кільця, що використовуються для обох поперечних перетинів. Рис. 1, а – це статорне кільце для еліптичних поперечних перетинів. Розтруб видно на стику СК та статорного кільця. На рис. 1, б показаний звичайний тип статорного кільця для круглих поперечних перетинів СК. Він має прямокутний перетин.

Загальноприйнята конструкція СК разом зі статорним кільцем має легкість обробки з точки зору виготовлення, а отже, набула широкого застосування. За нинішньою технологією можна виготовити статорне кільце розтрубного типу з еліптичною камерою [7]. Колони статора мають аеродинамічний профіль замість звичайного прямокутного профілю [8].

Поперечні перетини статорного кільця та колон статора знаходяться за допомогою механічної процедури проектування з коефіцієнтом безпеки 2 [9]. Враховуючи, що вхідний і вихідний кути лопатки колон статора вважаються постійними [10]. Значення їх знаходять за допомогою радіальної та окружної складових V_r та V_u .

2. Аналіз проектування з використанням CFD. Спочатку аналізується тільки еліптична конфігурація, використовуючи *CFD*, що містить підвідний трубопровід, НА, РК та відсмоктуючу трубу. Обираються відповідні відкриття НА та проводяться розрахунки за результатами яких можна визначити конфігурацію з найбільшим ККД [11]. Аналіз *CFD* дає високі значення гідравлічної ефективності, оскільки втрата на ступені генератора та інші механічні втрати виключаються з розрахунку ефективності, передбачається стаціонарний стан, а також шорсткість поверхні ігнорується [12]. Так само аналізується кругла конфігурація з використанням аналогічної комбінації відкриття лопаток НА.

3. Результати. Досліджувані ділянки поступово збільшуються від найменших до найбільших від 0° до 360°. Області, що враховуються в даному

дослідженні, розташовані на відстані 90° [13]. Для того, щоб спостерігати поведінку радіального потоку в області біля зубу, де ділянка є порівняно меншою, а також там, де є відхилення від припущення про потенційний потік.

Еліптична конструкція СК показує плавний перехід радіальної швидкості від спіралі через статорне кільце. Гладкий параболічний профіль для радіальної швидкості видно в еліптичних перерізах, а в круглих перерізах спостерігається невеликий відрив потоку в статорному кільці. У поперечному перетині статорного кільця радіальна швидкість має дуже малі значення для кожної конфігурації, незважаючи на те, що профіль швидкості для еліптичної конфігурації досить плавний.

Секція розтрубу спрямовує весь потік плавно без будь-якого поділу, тоді як невелика ділянка збурення спостерігається в звичайній конструкції СК на точці перетину між статорним кільцем та спіраллю.

Висновки. Еліптична конфігурація СК зі статорним кільцем розтрубного типу демонструє кращий розподіл радіальної швидкості та менший відрив потоку.

Напір нетто менший в еліптичній конфігурації. Його вплив можна побачити у значенні величини ККД, вона має дещо вищу величину в еліптичній конфігурації, ніж у круглій конфігурації. Тому, незважаючи на те, що величина крутного моменту на валу РК менше в еліптичній конфігурації, вона має порівняно більшу ефективність.

Втрати швидкості менші в еліптичній конфігурації. Це вказує на правильний вплив та ефективне використання наявної кінетичної енергії.

C_p – коефіцієнт статичного тиску, його значення має бути настільки низьким, наскільки це можливо. Враховуючи цей факт, C_p порівнюється для обох конфігурацій використовуючи результати *CFD*, його значення є вищим у круглій конфігурації. Таким чином, коефіцієнт статичного тиску C_p менший в еліптичній конфігурації, що знову підтверджується шляхом розрахунку втрат статичного тиску в обох конфігураціях спіралі.

Сумарна втрата тиску також менша в еліптичній конфігурації порівняно з круглою конфігурацією, що знову є вигідним. Отже, з наведеного вище дослідження розподілу радіальної швидкості та зіставлення різних параметрів для кожної конфігурації можна зробити висновок, що загальна гідравлічна поведінка еліптичної конфігурації, отриманої з аналізу *CFD*, виявилася кращою, ніж у звичайної круглій конфігурації, і сучасний дизайн СК з еліптичним поперечним перерізом та розтрубом демонструє хороше підтвердження розподілу потоку з незначним відривом, тоді як традиційна конструкція показує поганий розподіл потоку через статорне кільце.

У зв'язку із зростанням попиту на використання комплексу програм для розрахунку елементів проточної частини радіально-осьової гідротурбіни застосовується *CFD*. Він є потужним інструментом для оцінки поведінки потоку в гідравлічних турбінах, і

цей інструмент широко використовується в подібних дослідженнях для модернізації гідротурбін.

Список літератури

1. Барліт В. В. Гидравлические турбины / В. В. Барліт. – К: Вища школа, 1977. – 360 с.
2. Миронов К. А. Применение CFD при проектировании элементов проточной части гидротурбин / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко // Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No 20 (1192). – P. 116–121.
3. Барліт В. В. Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса: учебн. пособие / В. В. Барліт, К. А. Миронов, А. В. Власенко [и др.] – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 216 с.
4. Rudd F. O. Stress analysis of Hydraulic Turbine Parts / F. O. Rudd // Engg. Monographs no.30, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation.
5. Berhanu. Effects of Inlet Boundary Conditions on spiral casing simulation / Berhanu, Geberkiden // Master's Thesis, Luleå Uni. of Tech., Dept. of applied physics and Mechanical Engg. Division of Fluid Mechanics, 2007.
6. Riegels F. Aerofoil Sections / F. Riegels // С. 1–18, 62–72.
7. Nechleba M. Hydraulic Turbines / M. Nechleba // Their Design and Equipments, Constable & Co. – London, 1957.
8. Barlit V. V. Hydraulic turbines / V. V. Barlit, P. Krishnamachar, M. M. Deshmukh [et al]. – Bhopal: MANIT, 2007. – Vol. 1. 2.
9. Миронов К. А. Визначення та аналіз впливу розрахункових параметрів на ефективність радіально-осьових гідротурбін / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко // Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 42 (1264). – P. 66–70.
10. Junichi. Flow Characteristics in spiral casing of Hydraulic Turbines / Junichi, Hideaki // IAHR Symposium. – Montreal, Canada. – 1986.
11. Миронов К. А. Методика оптимізації лопатевої системи робочого колеса радіально-осьової гідротурбіни / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко // Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 22 (1244). – P. 49–54.
12. Berhanu. Effects of Inlet Boundary Conditions on spiral casing simulation / Berhanu, Cervantis // 2nd IAHR meeting of the workgroup on Cavitation and dynamic problems in hydraulic machineries and systems. – Timisoara, Romania. – 2007.
13. Kovalev N. N. Hydroturbine Design & Constructions / N. N. Kovalev // The National Science Foundation. – Washington. – 1965.

References (transliterated)

1. Barlit, V. V. *Gidravlicheskie turbiny*. Kiev: Vishha shkola, 1977. Print.
2. Mironov, K. A., and Y. Y. Oleksenko. "Primenenie CFD pri proektirovanii jelementov protochnoj chasti gidroturbin." *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydraulic units*. No. 20 (1192). Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. 116–121. Print.
3. Barlit, V. V., et al. *Raschet i proektirovanie protochnoj chasti reaktivnyh gidroturbin na osnove chislennogo modelirovaniya rabocheho processa: ucheb. posobie*. Kharkiv: NTU "HPI", 2008. Print.
4. Rudd, F. O. "Stress analysis of Hydraulic Turbine Parts." *Engg. Monographs* No. 30, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation. Print.
5. Berhanu. "Effects of Inlet Boundary Conditions on spiral casing simulation." *Master's Thesis, Luleå Uni. of Tech.*, Dept. of applied physics and Mechanical Engg. Division of Fluid Mechanics, 2007.
6. Riegels, F. *Aerofoil Sections*. 1–18, 62–72. Print.
7. Nechleba, M. *Hydraulic Turbines*. Their Design and Equipments, Constable & Co. London, 1957. Print.
8. Barlit, V. V., et al "Hydraulic turbines." Vol. 1.2. Bhopal: MANIT, 2007. Print.
9. Myronov, K. A. and Y. Y. Oleksenko. "Vyznachennia ta analiz vplyvu rozrakhunkovykh parametriv na efektyvnist radialno-osovykh hidroturbin." *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydrounits*. No. 42 (1264). Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 66–70. Print.

10. Junichi and Hideaki. "Flow Characteristics in spiral casing of Hydraulic Turbines". *IAHR Symposium*. Montreal, Canada, 1986. Print.
11. Myronov, K. A. and Y. Y. Oleksenko. "Metodyka optymizatsii lopatevoi systemy robochoho koleasa radialno-osovoi hidroturbiny" *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Hydraulic machines and hydrounits*. No. 22 (1244). Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 49–54. Print.
12. Berhanu. "Effects of Inlet Boundary Conditions on spiral casing simulation". *2nd IAHR meeting of the workgroup on Cavitation and dynamic problems in hydraulic machineries and systems*. Timisoara, Romania, 2007. Print.
13. Kovalev, N. N. *Hydroturbine Design & Constructions*. The National Science Foundation. Washington, 1965. Print.

Надійшла (received) 01.05.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Використання CFD для розрахунку спіральної камери та колон статора високонапірної радіально-осової гідротурбіни / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко, Д. Ю. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 50–53. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

Использование CFD для расчета спиральной камеры и колонн статора высоконапорной радиально-осевой гидротурбины / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко, Д. Ю. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 17 (1293). – С. 50–53. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

Using CFD for calculation of a spiral casing and stay vanes of a high-pressure Francis turbine / K. A. Mironov, Yu. Yu. Oleksenko, D. Yu. Bondarenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machinery and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2018. – No. 17 (1293). – P. 50–53. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2411-3441 (print), ISSN 2523-4471 (online).

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Миронов Костянтин Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

Миронов Константин Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

Mironov Konstantin Anatolievich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic Machines"; tel.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

Олексенко Юлія Юрїївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

Олексенко Юлия Юрьевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспірант кафедри «Гидравлические машины»; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

Oleksenko Yuliia Yuriivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of "Hydraulic Machines"; tel.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

Бондаренко Дар'я Юрїївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Гідравлічні машини»; тел.: (095) 704-27-76; e-mail: shudral88@gmail.com.

Бондаренко Дарья Юрьевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедри «Гидравлические машины»; тел.: (095) 704-27-76; e-mail: shudral88@gmail.com.

Bondarenko Daria Yuriivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of "Hydraulic Machines" tel.: (095) 704-27-76; e-mail: shudral88@gmail.com.