

*С.Ю. МИСЮРА, Н.В. СМЕТАНКИНА, Е.Ю. МИСЮРА*

### РАЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ ДЛЯ АНАЛИЗА МЦНОСТИ

Кришка гидротурбины є просторовою циклічно-симетричною конструкцією, що складається з тонкостінних оболонок обертання, об'єднаних  $n$ -ребрами – меридіональними пластинами складної конфігурації. Оскільки кришка являє собою просторову конструкцію, що складається з тонкостінних елементів, застосовується теорія тонких пластин і оболонок.

Задача полягає у дослідженні НДС вихідної та модифікованої кришки поворотно–лопатевої гидротурбины при дії статистичного осесиметричного навантаження і розв'язується методом скінченних елементів.

Дослідження НДС таких конструкцій починається з побудови моделі сектору, з яких складається досліджуваний об'єкт. При побудові моделі сектора спочатку задаються ключові точки в площині ребра, за якими будуються лінії, потім створюється модель ребра. Для отримання оболонкових частин конструкції і повної моделі сектору лінії перетину ребра і поверхонь оболонок повертаються за і проти годинникової стрілки на кут  $360/(2n)$ , де  $n$  – кількість секторів.

На границях сусідніх секторів виконуються умови циклічної симетрії.

Модель розбивається на скінченні елементи (трикутний пружний оболонковий скінченний елемент з трьома вузлами), після чого на границях з сусідніми секторами вводяться умови циклічної симетрії, а також умови закріплення та навантаження конструкції.

Метою роботи є створення методики розрахунку просторових циклічно-симетричних конструкцій (кришки гидротурбины) з радіальними ребрами.

Розрахунки кришки поворотно-лопатевої гидротурбины виконані для штатного режиму роботи, враховуючи вагові та розподілені гідравлічні навантаження. Виявлено, що у вихідній та модифікованій конструкціях максимальні напруження виникають в ребрах, які розташовані в коробі, де проходять лопатки направляючого апарату та не перевищують допустимих значень.

Отримані результати демонструють можливість проведення оптимізації кришок методами нелінійного математичного програмування на стадії проектування з метою поліпшення їх міцності, зниження матеріаломісткості без погіршення експлуатаційних і технологічних характеристик.

**Ключові слова:** кришка, поворотно-лопатева гидротурбина, штатний режим роботи, оптимізація.

*С.Ю. МИСЮРА, Н.В. СМЕТАНКИНА, Е.Ю. МИСЮРА*

### РАЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ

Крышка гидротурбины является пространственной циклическо-симметричной конструкцией, которая состоит из тонкостенных оболочек вращения, объединенных  $n$ -ребрами – меридиональными пластинами сложной конфигурации. Поскольку крышка представляет собой пространственную конструкцию, которая состоит из тонкостенных элементов, применяется теория тонких пластин и оболочек.

Задача заключается в исследовании НДС исходной и модифицированной крышки поворотно-лопаточной гидротурбины при действии статистической осесимметричной нагрузки и решается методом конечных элементов.

Исследование НДС таких конструкций начинается с построения модели сектора, из которых состоит исследуемый объект. При построении модели сектора сначала задаются ключевые точки в плоскости ребра, по которым строятся линии, затем создается модель ребра. Для получения оболочечных частей конструкции и полной модели сектора линии пересечения ребра и поверхностей оболочек поворачиваются по и против часовой стрелки на угол  $360/(2n)$ , где  $n$  – количество секторов.

На границах соседних секторов выполняются условия циклической симметрии.

Модель разбивается на конечные элементы (треугольный упругий оболочечный конечный элемент с тремя узлами), после чего на границах с соседними секторами вводятся условия циклической симметрии, а также условия закрепления и нагрузки конструкции.

Целью работы является создание методики расчета пространственных циклическо-симметричных конструкций (крышки гидротурбины) с радиальными ребрами.

Расчеты крышки поворотно-лопастной гидротурбины выполнены для штатного режима работы, учитывая весовые и распределены гидравлические нагрузки. Виявлено, что в исходной и модифицированной конструкциях максимальные напряжения возникают в ребрах, которые расположены в коробе, где проходят лопатки направляющего аппарата и но они не превышают допустимых значений.

Полученные результаты демонстрируют возможность проведения оптимизации крышек методами нелинейного математического программирования на стадии проектирования с целью улучшения их прочности, снижения материалоемкости, без ухудшения эксплуатационных и технологических характеристик.

**Ключевые слова:** крышка, поворотно-лопастная гидротурбина, штатный режим работы, оптимізація.

## RATIONAL MODELLING OF HYDROTURBINE COVER FOR AN STRENGTH'S ANALYSIS

A hydroturbine cover is a spatial cyclic-symmetrical structure consisting of thin-walled rotation shells forming  $n$ -ribs or meridional plates of complex configuration. Since the cover is a spatial structure consisting of thin-walled elements, the theory of thin plates and shells is used.

The problem consists in an investigation of stress-strain state of the initial and modified cover of a rotary-blade hydraulic turbine under the influence of a statistical axisymmetric load and it is solved by the finite element method.

This investigation starts with the construction of a sector model, which forms a hydroturbine cover. At constructing a sector model the key points in the plane of the edge are defined forming the lines, and then an edge model is created. To obtain the shell parts of the structure and the complete sector model, the intersection lines of the ribs and shell surfaces are rotated clockwise and counterclockwise by  $360^\circ/(2n)$ , where  $n$  is the number of sectors. Cyclic symmetry conditions are satisfied at the borders of neighboring sectors.

The model is divided into finite elements (triangular elastic shell finite element with three nodes is used). Then cyclic symmetry conditions and fixing and loading conditions of the structure are introduced at the borders with neighboring sectors.

The goal of this paper is to develop a methodology for calculating spatial cyclically symmetric structures (hydroturbine cover) with radial ribs.

Calculations for a rotary-blade hydraulic turbine have been performed for a fully functioning state, taking into account the weight and distributed hydraulic loads. It has been established that the maximal stresses occur in the ribs, which are located in the box, where the blades are moved, and do not exceed the permissible (limiting) values in the initial and modified constructions. The obtained results demonstrate the possibility of optimizing covers using nonlinear mathematical programming methods at the design stage in order to improve their strength, decrease a material consumption without reducing working and technological characteristics.

**Key words:** cover, rotary vane hydraulic turbine, fully functioning state, optimization.

**Вступ.** В останні роки, у зв'язку з конкуренцією, що загострилася на ринку енергетичного устаткування, різко зріс рівень вимог до його ефективності і надійності. Крім того, на ряді ГЕС, які працювали більше 35 років, енергетичні показники не відповідають сучасному рівню. Ця проблема вирішується шляхом реконструкції та заміни фізично зношеного та морально застарілого обладнання [1-4].

Особлива увага приділяється несучим конструкціям і робочим колесам турбіни, які знаходяться під динамічним впливом потоку води. До несучих конструкцій відноситься кришка гідротурбіни, яка представляє собою просторову конструкцію, що складається з тонкостінних тіл обертання (обичайок), підкріплених системою часто розташованих ребер – меридіональних багатозв'язних пластин. Вона не тільки обмежує зверху проточну частину турбіни, а й є несучою конструкцією, що сприймає значні навантаження від масових сил і гідродинамічного тиску, а також від радіального навантаження з боку ротора турбіни. Її кріплення до статора здійснюється великою кількістю вібростійких болтів з контрольованим затягуванням [4, 5]. Основна вимога при проектуванні кришки робочого колеса турбін – забезпечення міцності і жорсткості при мінімальній металоемності [5-7].

Оскільки кришка гідротурбіни є складною просторовою конструкцією, для розрахунку параметрів її напружено-деформованого стану (НДС) застосовується метод скінченних елементів (МСЕ) [8-11]. Перевагою цього методу є те, що він дозволяє прогнозувати НДС та коливання конструкції за різних умов експлуатації, регулюючи параметри поля потоку відповідно до конкретних умов роботи. Тому метод має важливе значення для оптимізації конструкції гідротурбін, а також стабілізації роботи на гідроелектростанціях.

У роботі [11] проведено на основі МСЕ аналіз НДС кришки гідротурбіни за допомогою програмного

забезпечення ANSYS. МСЕ використовується для розрахунку напружень на кришці. Ці розрахунки були зроблені для максимально можливого навантаження в робочому стані «LCI Quick Shut Down». Результати розрахунку еквівалентних напружень та деформацій порівнюються з існуючими результатами з огляду на безпечність конструкції.

У статтях [12, 13] описані методики та пакети прикладних програм, розроблені для досліджень динамічного НДС кришки гідротурбіни під впливом гідродинамічного навантаження та ваги вузлів та деталей, які розміщені на її поверхні. Задачу розв'язано у тривимірній постановці із застосуванням теорії гіперсингулярних рівнянь та поєднання МСЕ і методу граничних елементів.

Важливо точно прогнозувати деформаційні та вібраційні характеристики гідротурбінної конструкції для стабільної роботи, коли турбіна працює під змінним навантаженням потокового поля. У роботі [14] запропоновано методологію аналізу деформації кришки та амплітуди вібрацій у гідротурбінній системі Френсіса з високим типом. Складні поля потоку моделюються за допомогою комп'ютерної динаміки рідини (CFD). Аналіз деформацій кришки турбіни здійснено МСЕ. Результати розрахунку порівнюються з експериментальними результатами, демонструють добру узгодженість.

**Методика аналізу НДС кришки поворотного лопаткової гідротурбіни.** Кришка гідротурбіни є просторовою циклічно-симетричною конструкцією, що складається з тонкостінних оболонок обертання, об'єднаних  $n$ -ребрами – меридіональними пластинами складної конфігурації. Дослідження НДС таких конструкцій починається з побудови моделі сектору, з яких складається досліджуваний об'єкт. На границях сусідніх секторів виконуються умови циклічної симетрії.

При побудові моделі сектора спочатку задаються ключові точки в площині ребра, за якими будуються лінії, потім створюється модель ребра. Для отримання оболонкових частин конструкції і повної моделі сектору лінії перетину ребра і поверхонь оболонок повертаються за і проти годинникової стрілки на кут  $360/(2n)$ , де  $n$  – кількість секторів.

Оскільки кришка являє собою просторову конструкцію, що складається з тонкостінних елементів, для яких відношення товщини елементів конструкції до характерного розміру не перевищує  $1/10$ , застосовується теорія тонких пластин і оболонок.

Для розв'язання задачі статичного аналізу НДС використовується МСЕ. Роздільна система рівнянь записується у вигляді

$$[K]\{u\}=\{F\},$$

де  $[K]$  – матриця жорсткості;  $\{u\}$  – вектор вузлових переміщень;  $\{F\}$  – компоненти вектора сил, що визначають вплив зовнішніх навантажень [14].

Для розв'язання задачі використовується трикутний пружний оболонковий скінченний елемент з трьома вузлами. Елемент в кожному вузлі має шість ступенів свободи: переміщення в напрямку осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  і повороти навколо осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Геометрія, розташування вузлів  $I$ ,  $J$  і  $K$  і координатна система елемента показані на рис. 1.

Модель розбивається на скінченні елементи, після чого на межах з сусідніми секторами вводяться умови циклічної симетрії, а також умови закріплення та навантаження конструкції.

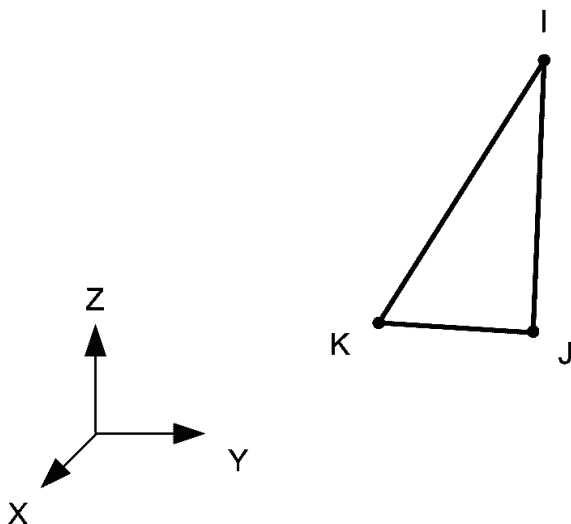


Рисунок 1 – Геометрія елемента

**Чисельне дослідження НДС кришки поворотно-лопатевої гідротурбіни. Опис об'єкта.** На рис. 2 показана схема кришки поворотно-лопатевої гідротурбіни. Для розміщення механізмів і зниження маси вузла в ребрах передбачені круглі отвори. У кільцевих пластинах створені фігурні отвори в вигляді профілю лопатки, які призначені для демонтажу та ремонту окремих лопаток без повного розбирання направляючого апарату.

Кришка має наступні габаритні розміри: діаметр – 3,44 м, висота – 1,05 м.

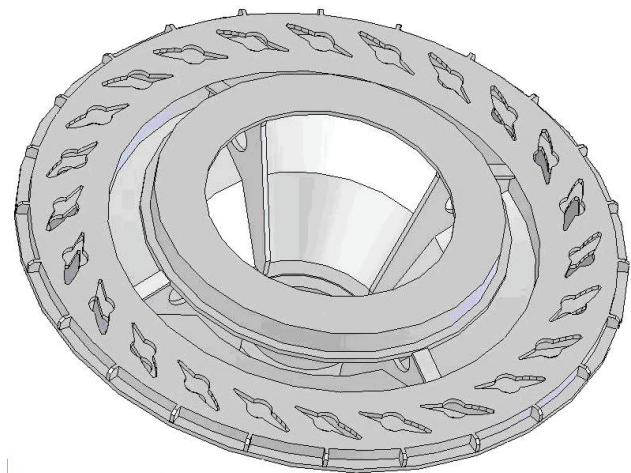


Рисунок 2 – Кришка поворотно-лопатевої гідротурбіни

Кришка виготовляється з листового прокату сталі Ст20 або його аналога ASTM A516 Gr.60.

Механічні властивості матеріалу такі:  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль пружності;  $\nu = 0,3$  – коефіцієнт Пуассона;  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup> – густина матеріалу;  $\sigma_T = 215$  МПа – межа текучості;  $\sigma_B = 430$  МПа – тимчасовий опір;  $[\sigma] = 0,5 \cdot \sigma_T = 107,5$  МПа – допустимі напруження.

**Розрахункова модель.** Для розв'язання задачі визначення НДС при дії статичного осьосиметричного навантаження розрахункова схема прийнята у вигляді сектора кришки з кутом розчину  $90^\circ$  і умовами симетрії на краях (рис. 3).

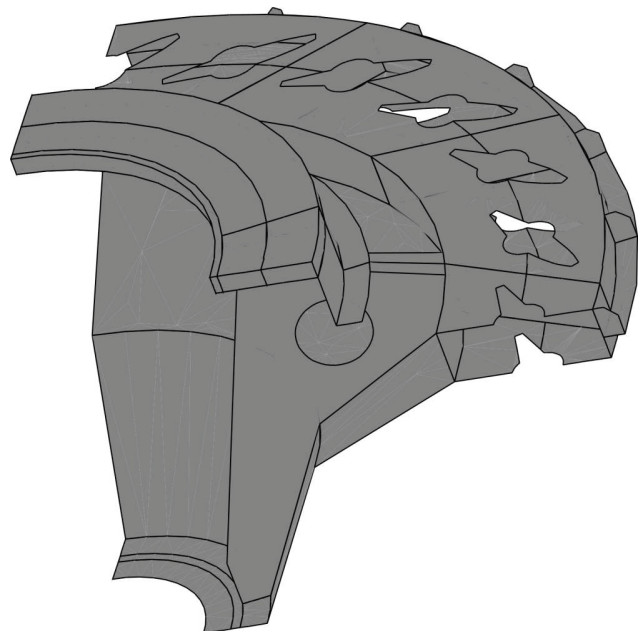


Рисунок 3 – Сектор кришки гідротурбіни

Вводяться умови закріплення кришки по опорній поверхні фланця, що з'єднує її з статорним кільцем, яке вважається абсолютно жорстким, уздовж окружності, на якій розташовані шпильки фланцевого з'єднання.

Вага генератора і робочого колеса  $P = 2,45 \cdot 10^5$  Н

прикладена до поверхні верхнього кільця у вигляді еквівалентного тиску (рис. 4).

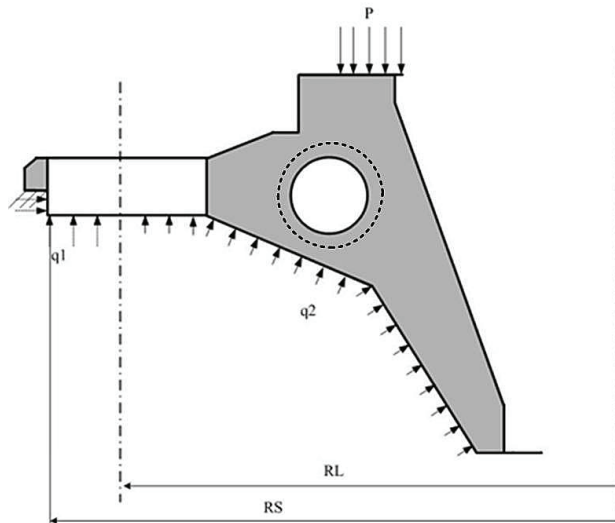


Рисунок 4 – Схема навантаження і закріплення конструкції

У штатному режимі до днища прикладено гідралічний тиск  $q_2 = 0,0965$  МПа.

При аварійній зупинці турбоагрегату тиск в відповідному водопроводі від радіуса кола  $RL$ , на якому розташовані лопатки направляючого апарату, до радіуса кола, на якому розташовані шпильки фланцевого з'єднання  $RS$ , різко підвищується від  $q_2$  до  $q_1 = 0,1254$  МПа. Тому чисельні результати наведені саме для цього випадку.

Пунктиром вказано модифікацію отвору в кришці гідротурбіни для розташування обладнання та зменшення ваги. Радіус збільшено в 1,5 рази.

Скінченноелементна модель сектора кришки гідротурбіни показана на (рис. 5).

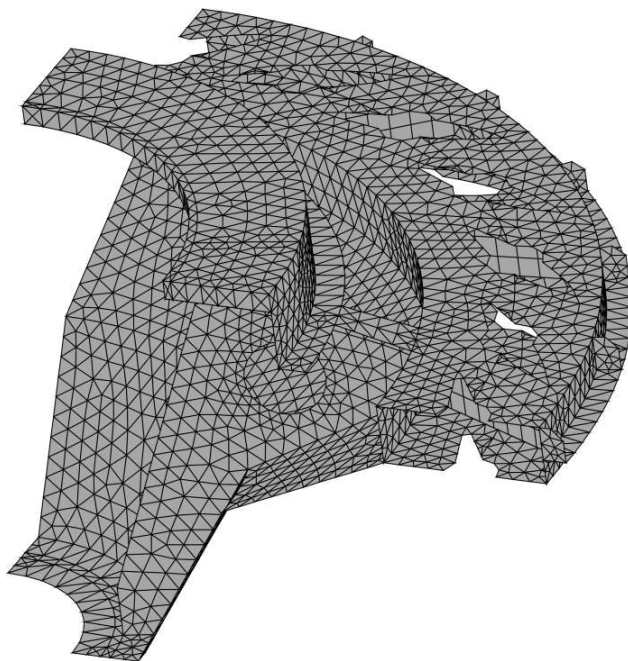


Рисунок 5 – Скінченноелементна модель сектора кришки гідротурбіни

**Аналіз НДС.** Розподіл осьових переміщень в конструкції кришки при штатному режимі роботи показано на рис. 6.

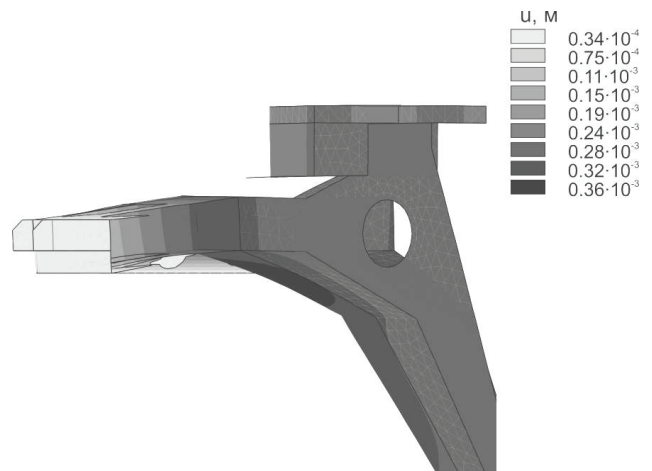


Рисунок 6 – Розподіл осьових переміщень при штатному режимі роботи

На рис. 7 дано розподіл інтенсивності напружень в конструкції кришки при штатному режимі роботи.

В результаті розрахунку вихідної конструкції отримані значення інтенсивності напружень і осьових переміщень.

При цьому отримуємо  $\sigma_{\max} = 30,1$  МПа, а  $u_{\max} = 0,36 \cdot 10^{-3}$  м.

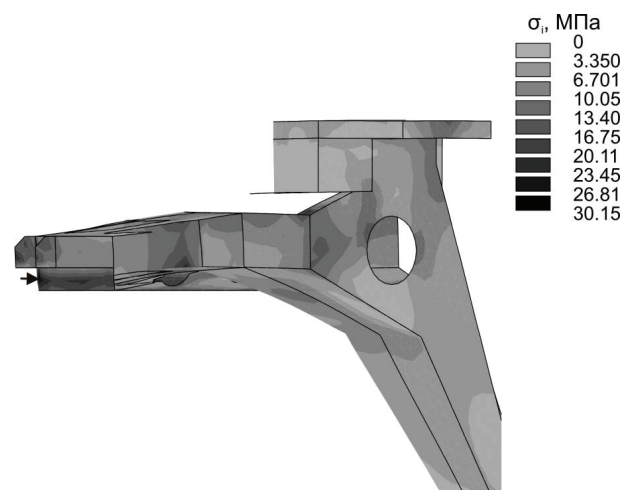


Рисунок 7 – Розподіл інтенсивності напружень в секторі в штатному режимі роботи

Максимальні напруження виникають в ребрах, які розташовані в коробі, де проходять лопатки направляючого апарату.

Стрілкою ( $\rightarrow$ ) показана зона, в якій спостерігається концентрація найбільших напружень.

Розподіл осьових переміщень в конструкції кришки при штатному режимі роботи при модифікації отвору показані на рис. 8.

На рис. 9 дано розподіл інтенсивності напружень в конструкції кришки при штатному режимі роботи при модифікації отвору.

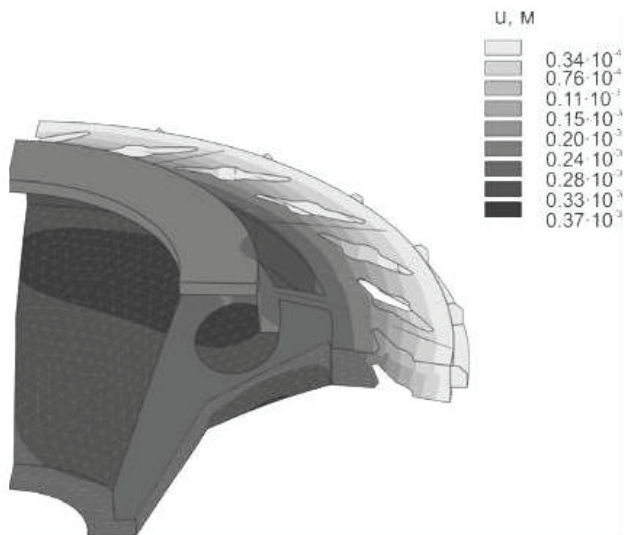


Рисунок 8 – Розподіл осевих переміщень при штатному режимі роботи при модифікації отвору

В результаті розрахунку вихідної конструкції отримані значення інтенсивності напружень і осевих переміщень. Їх найбільші значення є такими:  $\sigma_{\max} = 52,1$  МПа, а  $u_{\max} = 0,37 \cdot 10^{-3}$  м, що не перевищують допустимі.

Таким чином, конструкція має резерви для зниження маси та подальшого удосконалення її форми мето.

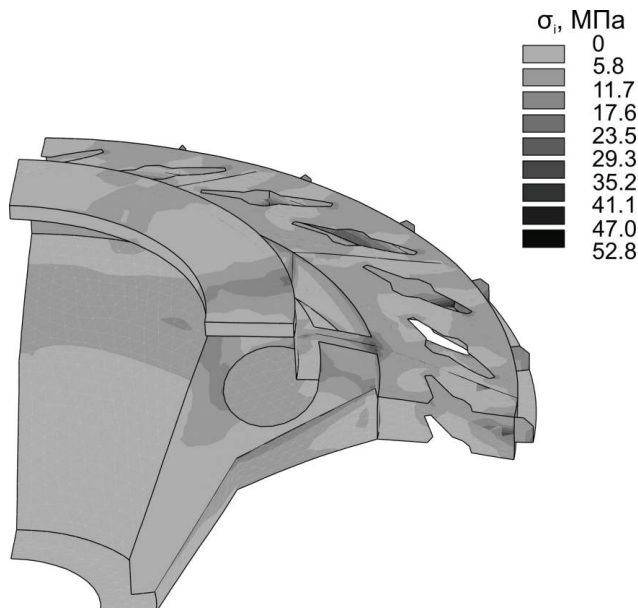


Рисунок 9 – Розподіл інтенсивності напружень при штатному режимі роботи при модифікації отвору

**Висновки.** Розроблено скінченно-елементну методику розрахунку просторових циклічно симетричних конструкцій з радіальними ребрами.

На основі представленої методики проведено аналіз НДС вихідної та модифікованої кришки поворотно-лопатевої гідротурбін.

Розрахунки кришки поворотно-лопатевої гідротурбіни виконані для штатного режиму роботи. При цьому враховувалися вагові та розподілені гідравлічні

навантаження.

Максимальні напруження не перевищують допустимих значень, як у вихідній конструкції, так і у модифікованій.

Отримані результати демонструють можливість проведення оптимального проектування кришок методами нелінійного математичного програмування на стадії проектування з метою поліпшення їх міцності, зниження матеріаломісткості без погіршення експлуатаційних і технологічних характеристик.

#### Список літератури

1. Серков В.С. Роль, задачи и проблемы развития стандартизации в обеспечении безопасности объектов гидроэнергетики. Гидротехническое строительство. 2010. № 7. С. 60-63.
2. Лобановский Ю.И. Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов. Гидротехническое строительство. 2010. № 7. С. 39-45.
3. Иванченко И.П., Воеводин С.И., Прокопенко А.Н. Натурные исследования гидродинамических нагрузок, действующих на крепеж крышки турбины. Гидроэнергетика. 2012. № 3 (28). С. 5-11.
4. Авдюшенко А.Ю., Черный С.Г., Чирков Д.В. Метод расчета осевых и радиальных нагрузок на рабочее колесо гидротурбины в нестационарном потоке. Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 4. С. 3-23.
5. Сметанкина Н. В., Мисюра С.Ю., Линник А.В. Влияние предварительно напряженного состояния на частоты несущих конструкций гидротурбин. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. Т. 1, № 38. С. 42-48.
6. Веремеенко И.С., Кантор Б.Я., Медведовская Т.Ф., Ржевская И.Е., Андриященко С.А. Прочность, динамика несущих конструкций и рабочих колес радиально-осевых гидротурбин. Авиационно-Космическая техника и технология. 2005. № 9 (25). С. 97-101.
7. Кантор Б. Я., Андриященко С.А., Мисюра С.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния крышки гидротурбины и возможностей совершенствования ее конструкции. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. Харків: НТУ «ХПІ». 2010. № 69. С. 58-67.
8. Zhang L., Sun K., Luo Q.-J. Hydrodynamic design of diversion cover for a tidal-stream hydro turbine. Journal of Harbin Engineering University. 2007. Vol. 28, No 7. P. 734-737.
9. Chen Z., Wang J., Liu H. Three-dimensional numerical analysis of flow-induced vibration in turbomachinery. J. Fluids Eng. 1999. Vol. 121, No 4. P. 804-807.
10. Bisen D., Shukla S., Sharma P.K. Optimization and Simulation of Hydro-Turbine Nozzle in Based on Ansys Analysis. Int. J. of Advance Engineering and Research Development. 2014. Vol. 1, iss. 10. P. 5-13.
11. Angra S., Kumari M., Kumar V. Structural Analysis of Hydro-Turbine Head Cover Using Ansys. Int. J. of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2015. Vol. 9, No. 3. P. 1-15.
12. Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. Int. J. Eng. and Advanced Research Technology. 2015. Vol. 1, No 1. P. 45-50.
13. Strelnikova E.A., Medvedovskaya T.F., Medvedeva E.L., Linnik F.V., Zelenskaya O.N. Use of computer technologies in modernization of head covers for ПЛІ 20-B-500 Kaplan turbines. J. Mech. Eng. 2018. Vol. 21, No 1. P. 35-44.
14. Jia Y., Li F.-Ch., Wei X.-Zh., Li X.-B., Li Zh.-H. A method for analysis of head cover deformation and vibration amplitude in Francis hydro-turbine system by combination of

CFD and FEA. J. of Mechanical Science and Technology. 2017. Vol. 31, iss. 9. P. 4255-4266.

#### References (transliterated)

1. *Serkov V. S.* Rol, zadachi i problemy razvitiya standartizatsii v obespechenii bezopasnosti obektov gid-roenergetiki. *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo*. 2010. № 7. P. 60-63.
2. *Lobanovskij Yu. I.* Avtokolebaniya napornyh sistem i razrushenie gidroagregatov. *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo*. 2010. № 7. P. 39-45.
3. *Ivanchenko I.P., Voevodin S.I., Prokopenko A.N.* Naturnye issledovaniya gidrodi-namicheskikh nagruzok, dejstvuyushih na kreppezh kryshki turbiny. *Gidroenergetika*. 2012. № 3 (28). P. 5-11.
4. *Avdyushenko A.Yu., Chyornyj S.G., Chirkov D.V.* Metod rascheta osevyh i radialnyh nagruzok na rabochee koleso gidroturbiny v nestacio-narnom potoke. *Vychislitelnye tehnologii*. 2013. Vol. 18, № 4. P. 3-23.
5. *Smetankina N.V., Misyura S.Yu., Linnik A.V.* Vliyanie predvaritelno naprya-zhennogo sostoyaniya na chastoty nesushih konstrukcij gidroturbin. *Visnik NTU «KhPI»*. Seriya: Dinamika i micnist mashin. Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. Vol. 1, № 38. P. 42-48.
6. *Veremeenko I.S., Kantor B.Ya., Medvedovskaya T.F., Rzhetskaya I.E., Andryushenko S.A.* Prochnost, dinamika nesushih konstrukcij i rabochih koles radialno-osevyh gidroturbin. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i Tehnologiya*. 2005. № 9 (25). P. 97-101.
7. *Kantor B.Ya., Andryushenko S.A., Misyura S.Yu.* issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kryshki

gidroturbiny i voz-mozhnostej sovershenstvovaniya ee konstrukcii. *Visnik NTU «KhPI»*. Seriya: Dinamika i micnist mashin. Kharkiv: NTU «KhPI». 2010. № 69. P. 58-67.

8. *Zhang L., Sun K., Luo Q.-J.* Hydrodynamic design of diversion cover for a tidal-stream hydro turbine. *Journal of Harbin Engineering University*. 2007. Vol. 28. No 7. P. 734-737.
9. *Chen Z., Wang J., Liu H.* Three-dimensional numerical analysis of flow-induced vibration in turbomachinery. *J. Fluids Eng.* 1999. Vol. 121, No 4. P. 804-807.
10. *Bisen D., Shukla S., Sharma P.K.* Optimization and Simulation of Hydro-Turbine Nozzle in Based on Ansys Analysis. *Int. J. of Advance Engineering and Research Development*. 2014. Vol. 1, iss. 10. P. 5-13.
11. *Angra S., Kumari M., Kumar M.* Structural analysis of hydroturbine head cover using ANSYS. *Int. J. of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2015. Vol. 9, No. 3. P. 1-15.
12. *Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K.* Free hydroelastic vibrations of hy-droturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1, No 1. P. 45-50.
13. *Strelnikova E.A., Medvedovskaya T.F., Medvedeva E.L., Linnik F.V., Zelenskaya O.N.* Use of computer technologies in mod-ernization of head covers for PL 20-B-500 Kaplan turbines. *J. Mech. Eng.* 2018. Vol. 21, No 1. P. 35-44.
14. *Jia Y., Li F.-Ch., Wei X.-Zh., Li X.-B., Li Zh.-H.* A method for analysis of head cover deformation and vibration amplitude in Francis hydro-turbine system by combination of CFD and FEA. *J. of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31, iss. 9. P. 4255-4266.

Надійшло (received) 18.09.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Місюра Сергій Юрійович (Мисюра Сергей Юрьевич, Misura Serhii Yuriyovych)** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу вібраційних і термоміцнісних конструкцій, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5048-1610>; (057)349-47-04, ; e-mail: [misurasy@gmail.com](mailto:misurasy@gmail.com)

**Сметанкіна Наталія Володимирівна (Сметанкина Наталья Владимировна, Smetankina Natalia Volodymyrivna)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу вібраційних і термоміцнісних конструкцій, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9528-3741>; (057)349-47-19, 349-47-55; e-mail: [nsmet@ipmach.kharkov.ua](mailto:nsmet@ipmach.kharkov.ua), [nsmetankina@ukr.net](mailto:nsmetankina@ukr.net)

**Місюра Євгенія Юрійівна (Мисюра Евгения Юрьевна, Misiura Ievgeniia Iuriivna)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та економіко-математичних методів, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5208-0853>; (057)702-04-05; e-mail: [misuraeu@gmail.com](mailto:misuraeu@gmail.com)