

УДК 621.224

К. А. МИРОНОВ, Ю. Ю. ОЛЕКСЕНКО**МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОПАТЕВОЇ СИСТЕМИ РОБОЧОГО КОЛЕСА РАДІАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ГІДРОТУРБИНИ**

При модернізації та проектуванні нових робочих коліс радіально-осьових гідротурбін необхідно використовувати комплексний підхід для знаходження найбільш вдалих технологічних рішень. Необхідною початковою точкою є створення геометрії лопаті з високими енергокавітаційними показниками. Для отримання оптимальних результатів розрахунку спроектована лопатева система повинна бути інтегрована, переважно автоматично, в модель САПР. Оптимальні геометричні параметри лопаті визначаються завдяки методиці оптимізації з використанням аналізу взаємодії структури рідини.

Ключові слова: CFD, гідротурбіна, робоче колесо, лопать, маточина, обід, змішана поверхня.

При модернизации и проектировании новых рабочих колес радиально-осевых гидротурбин необходимо использовать комплексный подход для нахождения наиболее приемлемых технологических решений. Необходимой отправной точкой является создание геометрии лопасти с высокими энергокавитационными показателями. Для получения оптимальных результатов расчета спроектированная лопастная система должна быть интегрирована, предпочтительно автоматически, в модель САПР. Оптимальные геометрические параметры лопасти определяются благодаря методике оптимизации с использованием анализа взаимодействия структуры жидкости.

Ключевые слова: CFD, гидротурбина, рабочее колесо, лопасть, ступица, обод, смешанная поверхность.

The maintenance of hydropower generators is a very important issue. They are designed to operate for several decades and during their lifetime several failures might happen. The maintenance of hydropower generators requires a complete set of process activities to support maintenance decisions. The acquisition of the actual geometry with high energy cavitations performance of the runner blade is a required starting point. Some maintenance geometric features do not have correspondence with design geometric features. In this case, preferably in automatic procedure, the maintenance geometric features must be inserted into the CAD model. Optimal values for maintenance geometric features parameters can be determined by simulation optimization technique using fluid structure interaction (FSI) analysis. Finally, immersive virtual reality facilitates the visualization of the results obtained from the finite element analysis.

Keywords: CFD, hydroturbine, runners, blade, hub, shroud, blending surfaces.

Вступ. Великою проблемою старих радіально-осьових (РО) гідротурбін (ГТ) є кавітація та тріщини. Такі проблеми викликають простій устаткування і приводять до серйозних наслідків, які впливають на експлуатаційні терміни служби РО ГТ.

Для зниження напруження і запобігання кавітації та тріщин використовується метод, котрий полягає в створенні змішаних поверхонь між лопаттю і ободом [1]. Ефективність цієї процедури була підтверджена за допомогою чисельного моделювання. Змішувани поверхні є дуже важливими геометричними особливостями. Був запропонований алгоритм автоматичного створення таких поверхонь змішування в моделі САПР [2].

Отримана модель САПР може бути оброблена за допомогою аналізу взаємодії рідкої структури [3], яка описує вплив між деформованою структурою зануреною в об'єм рідини. Слід зазначити, що обчислювальна гідродинаміка (CFD) є передовою альтернативою для перевірки ефективності РО ГТ [4].

Взаємодія структури потоку об'єднує CFD і обчислювальну структурну механіку (CSM). Таким чином, тиск рідини на змочуваний поверхні і напруження в конструкції можуть бути визначені одночасно.

Ключовим моментом є знаходження оптимального значення радіуса змішаних поверхонь, яке мінімізує напруження і утримує тиск в прийнятному значенні, отже, уникають можливості появи тріщин і кавітації. Оптимальне значення радіусу визначається запропонованою методикою оптимізації моделювання лопатевої системи робочого колеса (РК) [5]. Цільове призначення - це результат аналізу

взаємодії гідродинамічної структури, а радіус - параметр оптимізації. Нарешті, візуалізація результатів методу кінцевих елементів є непростим завданням, але сучасна віртуальна реальність може допомогти в процедурі візуалізації.

Геометричні характеристики лопаті робочого колеса. У статті розглядається відтворення, оптимізація, аналіз і візуалізація форми лопаті.

Для моделювання лопаті обрано програмне забезпечення *ANSYS Bladegen*, це інтерактивний інструмент проектування лопаті для моделювання турбомашин. Користувач може створювати нові лопаті з нуля або змінювати існуючі лопаті за допомогою введення хмари точок, отриманого, наприклад, при 3D-скануванні. *Bladegen* може обробляти різні обертові і нерухомі лопаті, включаючи осьові і радіальні лопаті, що застосовуються в: насосах, компресорах, турбінах, вентиляторах, турбокомпресорах та інших машинах [2-4].

Маточина і обід моделюються у програмі *Hypermesh* [4]. Лопать описана неоднорідним раціональним B-сплайном (поверхнею *NURBS*) з чотирма межами: вхідна кромка, профіль маточини, профіль обода і вихідна кромка (рис. 1). Вода під високим тиском входить крізь простір між вхідними кромками і тече через об'єм між двома сусідніми лопатями. Вода виходить через простір між вихідними кромками. Профіль обода є межею, яка відокремлює обід і лопать, а профіль маточини відокремлює маточину і лопать. Змішувана поверхня створюється з урахуванням цих двох меж.

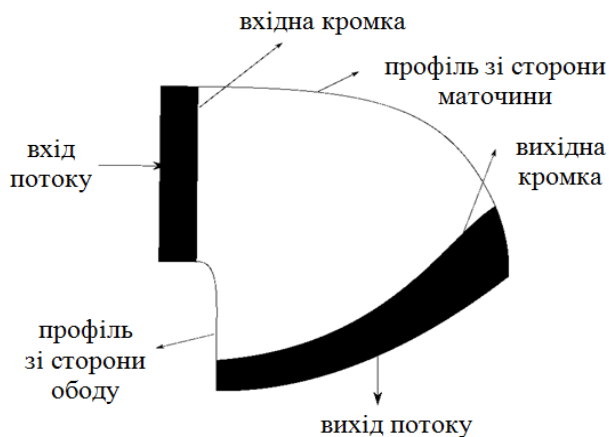


Рис. 1 – Лопатець РК та її межі

Методика. Запропонована методика спрямована оптимізацію структури РК ГТ шляхом моделювання його як функції зумовлених геометричних параметрів. Чисельний аналіз заснований на взаємодії структури рідини та між потоком рідини і ГТ [6].

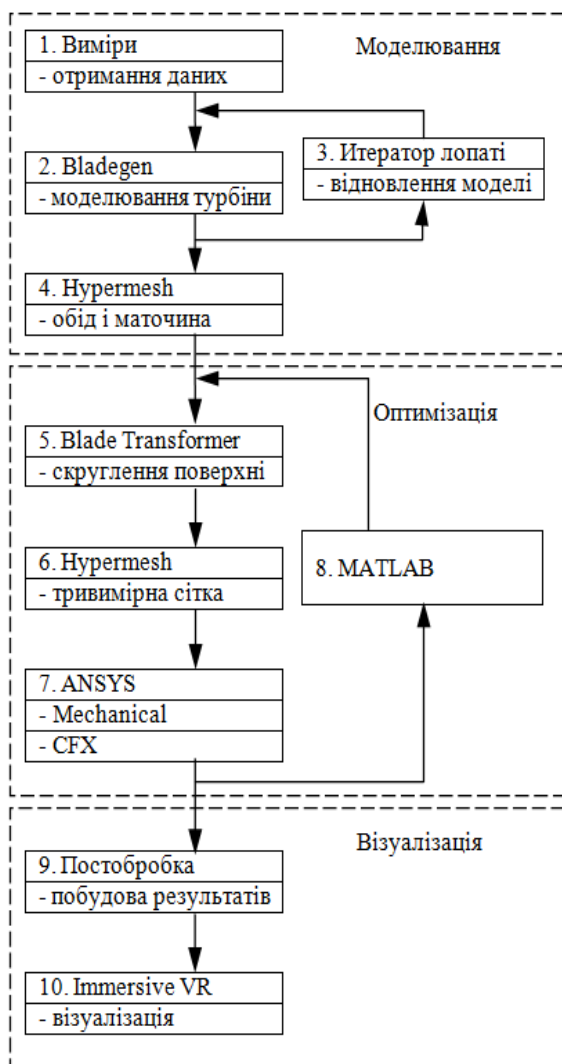


Рис. 2 – Методика оптимізації структури РК ГТ

Ця методика реалізована в наступному програмному забезпеченні:

- *ANSYS BladeGen* для створення моделі лопаті;
- *Blade Transformer* для включення нових геометричних характеристик в модель;
- *ANSYS CFX* для розрахунку потоку рідини;
- *ANSYS Mechanical* для розрахунку структурних реакцій ГТ;
- *Hypermesh* для моделювання ободу і маточини, до того ж в цій програмі модель дискретизується в сітку кінцевих елементів;
- *MATLAB* реалізує виконання параметричної оптимізації, спрямованої на поліпшення механічних структурних властивостей лопатей, підвищення безпеки під час роботи і збільшення терміну служби.

Схема запропонованої методики зображена на рис. 2.

Моделювання. Першим кроком є визначення геометрії поверхні лопаті з використанням програмного забезпечення *ANSYS BladeGen*. Вихідний файл знаходиться в форматі *IGES* і містить тверду модель лопаті і суцільну геометрію ділянки рідини, представлену в неявному вигляді. Вперше лопатець потрібно створити. При подальшому виконанні програмного забезпечення *ANSYS BladeGen* модель автоматично оновлюється.

Другий етап – це процес відтворення. Якщо ми хочемо відтворити вже існуючу лопатець РК РО ГТ, то необхідно зробити заміри за допомогою переносної консолі та записати послідовність точок на поверхні лопаті. На другому етапі отримані точки відзначаються на поверхні лопаті за допомогою ітеративного алгоритму найближчих точок [7]. Отримані точки проєктуються на поверхню лопаті і визначаються їх відстані до поверхні. Ітерація припиняється, коли ніяких поліпшень не може бути зроблено або загальна відстань нижче граничного.

Третій крок полягає в моделюванні маточини та ободу РК РО ГТ. Ця процедура може бути виконана в будь-якому програмному пакеті *3D CAD*, який імпортує формат *IGES*. Моделювання маточини і обода має бути виконано з урахуванням тільки однієї лопаті, оскільки програмне забезпечення використовує повторювані умови для моделювання циклічної періодичності ГТ. Всі поверхні класифікуються за групами з використанням функціональних компонентів програми *Hypermesh*. Таким чином, поверхні можна ідентифікувати і грамотно використовувати в інших програмах. Вихідний файл являє собою новий файл *IGES*, що містить тверду модель лопаті, маточини і обода робочого колеса РО ГТ [7].

Аналіз. Четвертою дією є визначення пари поверхонь, які повинні бути з'єднані плавним чином в *Blade Transformer*. Ця програма відповідає за перетворення геометрії РК відповідно до параметричних змінних. У цьому дослідженні головна задача оптимізації полягає в знаходженні найкращого радіусу між маточиною і лопаттю (r_1) і між ободом і лопаттю (r_2). Програма зчитує файл

IGES, отриманий на попередньому кроці. Після визначення поверхонь операцію можна виконати за допомогою пакетного файлу, в автоматичному режимі. На виході отримуємо лише один файл *IGES*, що містить тверду модель лопаті (тепер зі змішаними поверхнями) і твердотільну геометрію області рідини.

П'ятий пункт складається зі створення сітки для обох об'єктів, тобто пов'язує РК і область потоку рідини. Це можна зробити в *HyperMesh*, який дозволяє генерувати сітку за допомогою пакетної команди, а також може генерувати *CFD*-комірки. Кожна сітка виконується окремо, і інтерфейси між обома сітками не обов'язково повинні бути рівними, оскільки *ANSYS* інтерполює дані в інтерфейсі рідкої структури. По-перше, обидві сітки створюються користувачем. Після затвердження сіток можливо створити пакетний файл, який буде автоматично пов'язувати обидва тіла за допомогою пакетної команди відповідно до тих самих характеристик сіток, створених користувачем. Вихідні файли знаходяться в форматі *CDB*, який може бути прочитаний *ANSYS*.

Шостий крок полягає в тому, щоб налаштувати моделювання як для ГТ, так і для аналізу потоку рідини. Граничні умови РК додаються *APDL*-файлом, який є сценарієм, що містить команди *ANSYS*. Граничні умови в області рідини визначаються структурою даних, файл якої має розширення *PRE*. Використовуючи командний рядок *cfx5pre*, генерується файл *DEF*, який є файлом *CFX*, що містить всю необхідну інформацію для запуску аналізу, включаючи взаємодію рідкої структури. Після запуску моделювання результати вилучаються через файл *CSV*, який містить перелік даних, такі як тиск рідини, механічні концентрації напружень та інші.

Оптимізація. Всі попередні кроки можуть бути виконані в пакетному режимі, який означає, що всі команди можна контролювати за допомогою зовнішнього програмного забезпечення. Таким чином, програма реалізується в *MATLAB*, який виконує з четвертого по шостий кроки в пакетному режимі. Розрахункові змінні - це значення радіусів, змодельовані на другому кроці. Вони обмежені мінімальними і максимальними значеннями, щоб зберегти геометрію РК.

Візуалізація. Наступним кроком є створення графіків з отриманих результатів, відповідно до того, що було центром уваги дослідження. Прикладом графіків даних є розподіл механічних напружень в РО ГТ і лініях току рідини. Далі відбувається перетворення результатів методу кінцевих елементів в видимий формат даних.

Відтворення лопаті. Обрані точки поєднуються з точками вздовж поверхні лопаті, що включає в себе послідовність, яка приблизно дорівнює її вхідній кромці, а інша - приблизно дорівнює її вихідній кромці. Вони також містять два ряди, зняті за двома круговим елементам на зовнішньому ободі ГТ.

Потрібна співвісність задається при монтажі кіл, тому результуючі окружності мають одну і ту ж саму

вісь, прийняту в подальшому як найкращу оцінку для оберткової осі ГТ.

Беручи оцінювану вісь обертання як координату z і перетин осей x, y , контур лопаті $z-r$ створюється в *Bladegen* з проекції $z-r$ всіх отриманих точок. На цьому етапі геометрія лопаті все ще не визначена в координатах θ як в її товщині [6].

Це невизначене завдання розглядається як проблема знаходження розподілу товщини θ в програмі *ANSYS Bladegen*, яка мінімізує відстань від нової геометрії і точок вимірювань на тілі лопаті.

Проте, це повинно бути зроблено з обережністю, так як тіло лопаті потоншується на стику з маточиною і ободом. Ці особливості потоншення не належать до вихідної геометрії лопаті і повинні ігноруватися, тому відповідні виміряні точки викидаються.

Для розподілу θ в проекції $z-r$ прийняті 25 контрольних точок Безье. Для товщини 5 точок Безье приймаються уздовж меридіональної кривої лопаті. Товщина задається як нуль на вхідній і вихідній кромках [8].

Алгоритм мінімізації Нельдера-Міда використовується для зведення до мінімуму загального квадрата відстані від вимірюваних точок. Програмне забезпечення *ANSYS Bladegen* викликається неінтерактивно, використовуючи режим пакетної обробки.

Аналіз і оптимізація. Взаємодія між рідкими структурами (*FSI*) - явище мультифізики, яке має місце в системі, де потік рідини викликає деформування твердої структури, яка, в свою чергу, змінює граничний стан рідкої системи. Це також може статися з точністю навпаки, коли структура змінює властивості потоку рідини. Така взаємодія відбувається в багатьох природних явищах і техногенних інженерних системах [9].

Це стає важливим фактором при проектуванні та аналізі різних інженерних систем. Деякі додатки *FSI* включають, але не обмежуються ними, седиментацію [10], аеродинаміку, турбулентність, складні потоки в нерівномірних областях, біорідини і біомеханіку (такі як взаємодія крові і серця, плавання медуз, тощо).

Протягом останніх десяти років моделювання задач мультифізики стало більш важливим в області чисельного моделювання та аналізу. Для вирішення таких проблем взаємодії конструкції і моделі потоку, необхідно включати рівняння, які описують динаміку потоку і структурну механіку. Незважаючи на потік вирішувачі можуть використовуватися для вирішення у відповідних сферах, зв'язок тобто обмін результатами було розглянуто як одне з найскладніших завдань в зв'язку з нелінійним характером рідини суцільного середовища. Однак, технічні досягнення в області *CFD*, *CSM* і числових алгоритмів зробили чисельний аналіз *FSI* більш реалістичним для виконання в розумні терміни. Останнім часом розробляється і створюється багато комерційних програмних продуктів для моделювання проблем *FSI*, таких як *ANSYS* [11].

Постановка завдання оптимізації може бути сформульована:

$$\text{Мінімізувати: } F = \sigma_{\max} \quad (1)$$

$$\text{за умови: } r_{\min} \leq r_i \leq r_{\max} \quad i = 1, \dots, 4,$$

де σ_{\max} – приймає максимальне значення механічної напруги в турбіні на кожній ітерації;

r_i – розрахункові змінні;

r_{\min} і r_{\max} – є обмеженнями розрахункових змінних.

Чутливість розрахункових змінних обчислюється з використанням методу кінцевих різниць (FDM). Завдання оптимізації вирішується за допомогою методу рухливих асимптот (MMA) [12].

Blade Transformer приймає файл *IGES*, де представлені поверхні з некогерентною орієнтацією. Правильна орієнтація і суміжність між поверхнями автоматично визначається алгоритмом *marching cubes* [13]. Після відновлення твердотільних моделей лопаті та потоку, геометрію лопаті модифікують шляхом побудови змішуваних поверхонь, відповідальних за згладжування зв'язку між поверхнями лопатей і поверхонь обода і маточини. Ця побудова виконується за допомогою алгоритму, заснованому на змішуванні обертових куль між двома поверхнями при заданій контактній кривій [14]. Змішану поверхню описується як особливий вид, як ніби куля заданого радіуса оберталась в той час, коли зберігається контакт з двома обраними поверхнями. Замість постійного радіуса для рухомої кулі, дана реалізація обробляє змінні значення радіуса по кромкам. Зберігаючи метафору, так як куля оберталась, вона також зростає (або зменшується). Радіус в кожному перерізі лінійно інтерполюється між двома крайніми значеннями: один для всієї вхідної кромки, а інший для центральної точки вихідної кромки. Комбінація дає в загальній складності чотири радіуса по 2 для кожної поверхні змішування.

Для того, щоб скористатися тією ж топологічною реалізацією *NURBS*, запропонована куля проходить кілька дискретних ділянок на всіх кромках між поверхнями лопаті і її основами (як обода, так і маточини), тоді як кожна секція зручно визначається поточними контрольними точками *NURBS* цих кромок. Між поверхнею лопаті і обода є чотири кромки: одна від поверхні вхідної кромки, інша від вихідної кромки і дві від кожної бічної поверхні (сторона тиску і сторона розрядження). Є ще чотири паралельних кромки між тими ж поверхнями лопаті і маточини, знаходимо суму всіх восьми кромок.

Immersive Virtual Reality. *Immersive Virtual Reality* використовує вплив на зоровий канал людини. Згідно досліджень [15], більше половини наших нейронів присвячено зору. Це пояснює прийняття технологій повного занурення для аналізу великих обсягів даних, оскільки людський зір може визначати кращі моделі, тенденції та аномалії в своїх даних, які

значно переважають ті, що вони можуть зробити зі звичайними тривимірними дисплеями.

Прийняте рішення включає в себе шолом віртуальної реальності, ігровий контролер і комп'ютер для відтворення тривимірної графіки. Шолом віртуальної реальності називається *Oculus Rift*, пристрій, розроблений насамперед для використання в комп'ютерних іграх. Він пропонує тривимірний стереоскопічний вид і датчики подібні акселерометрам, а також камеру стеження, щоб фіксувати переміщення користувача, що забезпечує допустиме занурення в візуалізацію 3D-моделей. Щоб поліпшити занурення, в рішенні використовують ігровий контролер для управління основними командами, такими як три ступені свободи руху і перемикання між режимами візуалізації.

Що стосується комп'ютерного програмного забезпечення, розробленого для 3D-зображення, оброблені сітки кінцевих елементів демонструють фактичні результати чисельного аналізу. Деформації та напруження представлені у ГТ, а також на межі конструкції ГТ. Дані аналізу кінцевих елементів повинні бути оброблені, щоб вписатися в графічні дані, і створити зображення. Переведення сітки кінцевих елементів в сітку візуалізації не є прямою процедурою.

Щоб візуалізувати зображення поверхні сітки з кінцевими елементами, необхідно додати внутрішні грані [16]. Більш того, оскільки всі грані є різними об'єктами і кожна вершина в якій міститься грань має нормальний вектор отримане зображення є гранованою поверхнею. Щоб уникнути цієї проблеми, нормальні вектори кожної вершини, що перетинають один і той же вузол на поверхні, нормалізуються, виробляючи остаточно гладку поверхню.

Однак гладкість не потрібна на поверхнях відомих ребер. У цьому випадку кожний нормальний вектор в процесі нормалізації порівнюється з іншим на тому ж вузлі. Якщо кутова різниця більше заданого кута α , то нормалізацією нехтуємо. В іншому випадку, середній вектор перевизначає всі нормальні вектори вузла.

Для відображення швидкості і тиску рідини, яка протікає навколо твердого тіла, використовуються лінії току.

В результаті була реалізована візуалізація даних кінцевих елементів. Вона має програмне забезпечення 3D зображення, яке може відображати структуру ГТ, навантаження і деформації на поверхні ГТ і потік рідини навколо структури. Користувач може переміщати курсор віртуальної реальності, використовуючи ігровий контролер. Цей пристрій підходить для використання в поєднанні з дисплеєм вбудованим в шолом. Таким чином отримуємо стереоскопічний вид конструкції ГТ та лінії току швидкості потоку і напружень. Навігація по виду здійснюється за допомогою ігрового контролера [15].

Результати. На зображенні кінцевих результатів можна спостерігати вимірні точки і остаточно відтворену поверхню лопаті. Кінцева

середньоквадратична помилка апроксимації становить 10,61 мм. З цих результатів можна зробити висновок про те, що фізична товщина лопаті не постійна на різних висотах, але трохи товща поблизу маточини, ніж поруч з ободом [6].

Також можливо отримати таблицю результатів ітерацій розрахованих при оптимізації моделювання. В таблиці наведені радіуси для межі профілю зі сторони обода на вхідній кромці та центральній точці вихідної кромки і їх аналоги для межі зі сторони маточини. В моделюванні радіус слід вважати постійною величиною.

Висновки. У статті запропонована методика для відтворення лопаті РО ГТ. Відтворена поверхня лопаті РК має конструктивну узгодженість, оскільки параметри програми проектування лопаті (програмне забезпечення *ANSYS BladeGen*) контролюються зовнішньої оптимізацією. Властивості геометричного змісту оптимізуються з використанням методу оптимізації моделювання, при якому максимальний тиск, отриманий за допомогою аналізу FSI, мінімізується. Функція параметрів геометричного змісту – це радіуси двох поверхонь змішування, які відсутні на етапі проектування. Змішувани поверхні автоматично включаються в твердотільну модель за допомогою проміжної програми *Blade Transformer*. Остаточні результати візуалізуються через систему *immersive virtual reality* за допомогою сучасного обладнання, технологій і можливостей програмного забезпечення. Візуалізація в такий спосіб дає можливість повністю зануритись в стереоскопічний вид конструкції. Таким чином людина, а не машина, обертає 3D зображення та обирає модель з кращими характеристиками, визначає недоліки, аналізує та приймає рішення. Комплексний підхід методика дає змогу знайти більш вдалі технологічні рішення для оптимізації лопатевої системи та подовжувати строк служби агрегату. Методика може використовуватися при модернізації та проектуванні нових лопатевих систем РО ГТ, також вона допоможе спроектувати лопатеву систему РК з високими енергокавітаційними показниками.

Список літератури

1. *Sobrinho E.* Development of a methodology for evaluation of a structural damage in turbine blades from hydropower generators / *E. Sobrinho, R. Sanomya, R. Ueda [et al.]*. – In Proceedings 20th COBEM. Gramado, Brazil, 2009.
2. *Castro EG.* Automatic creation of blending surfaces in hydropower generators turbine blades / *EG. Castro, MSG. Tsuzuki, ECN. Silva [et al.]*. – In Proceedings 19th World Congress IFAC. Cape Town, South Africa, 2014.
3. *Campbell RL.* Fluid–structure interaction analysis of flexible turbomachinery / *RL. Campbell, EG. Paterson* // *Journal of Fluids and Structures* Vol. 27, Issue 8, 2011. – C. 1376–1391.
4. *Choi HJ.* CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine / *HJ. Choi, MA. Zullah, HW. Roh [et al.]*. // *Renewable Energy* Vol. 54, 2013. – C. 111–123.
5. *Ahmed MA.* Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait / *MA. Ahmed, TM. Alkhamis* // *European Journal of Operational Research* Vol. 198, Issue 3, 2009. – C. 936–942.
6. *Tsuzuki MSG.* Development of a Complete Methodology to Reconstruct, Optimize, Analyze and Visualize Francis Turbine

- Runners / *MSG. Tsuzuki, SL. Vatanabe, EG. Castro [et al.]*. // *IFAC* Vol. 48, Issue 3, 2015. – C. 1900–1905.
7. *Takimoto RY.* 3D reconstruction using low precision scanner / *RY. Takimoto, R. Vogelaar, EK. Ueda [et al.]*. – In Proceedings 1th IFAC Workshop IMS 2013. Sao Paulo, Brazil, 2013. – C. 239–244.
8. *Барліт В. В.* Расчет и проектирование проточной части реактивных гидротурбин на основе численного моделирования рабочего процесса: Учеб. пособие / *В. В. Барліт, К. А. Миронов, А. В. Власенко, [и др.]*. // Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 216 с.
9. *Hou GN.* Numerical methods for fluid-structure interaction – a review / *GN. Hou, J. Wang, A. Layton* // *Communications in Computational Physics* Vol. 12, Issue 2, 2012. – C. 337–377.
10. *Mucha PJ.* A model for velocity fluctuations in sedimentation / *PJ. Mucha, SY. Tee, DA. Weitz [et al.]*. // *J. Fluid Mech* Vol. 501, 2004. – C. 71–104.
11. *Басов К. А.* ANSYS. Справочник пользователя / *К. А. Басов* – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
12. *Svanberg K.* The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization / *K. Svanberg* // *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Vol. 24, Issue 2, 1987. – C. 359–373.
13. *Tsuzuki MSG.* Converting CSG models into meshed B-Rep models using Euler operators and propagation based marching cubes / *MSG. Tsuzuki, FK. Takase, MAS. Garcia [et al.]*. // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* Vol. 29, Issue 4, Rio de Janeiro, Brazil, 2007. – C. 337–344.
14. *Huang L.* Construction of blending surfaces / *L. Huang, X. Zhu* – Technical Report, HZ-TMSurf-Huang04, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2000.
15. *van Dam A.* Experiments in immersive virtual reality for scientific visualization / *A. van Dam, DH. Laidlaw, RM. Simpson* // *Computers & Graphics* Vol. 26, Issue 4, 2002. – C. 535–555.
16. *Benes S.* Efficient methods to visualize finite element meshes / *S. Benes, J. Krus* // *Advances in Engineering Software* Vol. 79, 2015. – C. 81–90.

References (transliterated)

1. *Sobrinho, E., et al.* "Development of a methodology for evaluation of a structural damage in turbine blades from hydropower generators." In *Proceedings 20th COBEM*. Gramado, Brazil, 2009. Print.
2. *Castro, EG., et al.* "Automatic creation of blending surfaces in hydropower generators turbine blades." In *Proceedings 19th World Congress IFAC*. Cape Town, South Africa, 2014. Print.
3. *Campbell, RL., and EG. Paterson.* "Fluid–structure interaction analysis of flexible turbomachinery." *Journal of Fluids and Structures* Vol. 27, Issue 8, 2011. 1376–1391. Print.
4. *Choi, HJ., et al.* "CFD validation of performance improvement of a 500 kW Francis turbine." *Renewable Energy* Vol. 54, 2013. 111–123. Print.
5. *Ahmed, MA., and TM. Alkhamis.* "Simulation optimization for an emergency department healthcare unit in Kuwait." *European Journal of Operational Research* Vol. 198, Issue 3, 2009. 936–942. Print.
6. *Tsuzuki, MSG., et al.* "Development of a Complete Methodology to Reconstruct, Optimize, Analyze and Visualize Francis Turbine Runners." *IFAC* Vol. 48, Issue 3, 2015. 1900–1905. Print.
7. *Takimoto, RY., et al.* "3D reconstruction using low precision scanner." In *Proceedings 11th IFAC Workshop IMS 2013*. Sao Paulo, Brazil, 2013. 239–244. Print.
8. *Барліт, В. В., et al.* *Raschet i proektirovanie protochnoj chasti reaktivnyh gidroturbin na osnove chislenogo modelirovanija rabocheho processa: ucheb. posobie*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. Print.
9. *Hou, GN., J. Wang, and A. Layton.* "Numerical methods for fluid-structure interaction – a review." *Communications in Computational Physics* Vol. 12, Issue 2, 2012. 337–377. Print.
10. *Mucha, PJ., et al.* "A model for velocity fluctuations in sedimentation." *J. Fluid Mech* Vol. 501, 2004. 71–104. Print.
11. *Басов, К. А.* *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelja*. Moscow: DМК Press, 2005. Print.
12. *Svanberg, K.* "The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Vol. 24, Issue 2, 1987. 359–373. Print.

13. Tsuzuki, MSG., et al. "Converting CSG models into meshed B-Rep models using Euler operators and propagation based marching cubes." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* Vol. 29, Issue 4, Rio de Janeiro, Brazil, 2007. 337–344. Print.
14. Huang, L., and X. Zhu. "Construction of blending surfaces." *Technical Report, HZ-TMSurf-Huang04, Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2000. Print.
15. Van Dam, A., DH. Laidlaw, and RM. Simpson. "Experiments in immersive virtual reality for scientific visualization." *Computers & Graphics* Vol. 26, Issue 4, 2002. 535–555. Print.
16. Benes, S., and J. Krus. "Efficient methods to visualize finite element meshes." *Advances in Engineering Software* Vol. 79, 2015. 81–90. Print.

Надійшла (received) 31.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика оптимізації лопатевої системи робочого колеса радіально-осьової гідротурбіни / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 49–54. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2411-3441.

Методика оптимизации лопастной системы рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 22 (1244). – С. 49–54. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2411-3441.

Methods optimization blades runner of Francis turbine / К. А. Mironov, Yu. Yu. Oleksenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machinery and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 22 (1244). – P. 49–54. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2411-3441.

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 Юріївна – 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», аспирант кафедры «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.