

УДК 539.3

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.10

## ПАРАМЕТРИЗОВАНЕ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НДС ЛОПАТОК РОБОЧИХ КОЛІС ПАРОВИХ ТУРБІН

**О. О. ЛАРИН**

Кафедра динаміки та міцності машин, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут»,  
Харків, УКРАЇНА  
email: AlexeyA.Larin@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** В статті представлено методику побудови розрахункових скінченно-елементних моделей лопаток парових турбін. Представлено параметризований опис структури робочої лопатки, виділено зв'язки між її геометричними параметрами. Запропоновано алгоритми автоматизованої побудови геометричних тривимірних моделей, що дозволяє автоматизовано наносити розрахункову сітку, накладати граничні умови та навантаження. В якості прикладу розглянуто побудову моделі робочої лопатки третьої ступеня циліндру низького тиску парової турбіни. Проведено аналіз статичного напружено-деформованого стану (НДС) даного лопаткового апарату в циклічно-симетричній постановці. Досліджено закономірності впливу наявності технологічних зазорів в бандажному з'єднанні на НДС лопатки в полі відцентрових сил.

**Ключові слова:** НДС; робочі лопатки парових турбін; МСЕ; автоматизоване проектування

## PARAMETRIC FINITE ELEMENT MODELLING OF DEFORMED STATE OF STEAM TURBINE BLADE ASSEMBLIES

**O. O. LARIN**

Dynamics and strength of machines department, National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute",  
Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The paper presents a methodology for construction of computational finite element models of steam turbines blade assemblies. A parameterized description of the driven wheel blade structure is presented. The set of geometric parameters and the system of association between them is defined. The algorithms of the automated construction of geometric three-dimensional models is developed, which allows you to apply automated computational mesh, boundary conditions and load. As an example the construction of a model of the rotor blade of the third stage of the low pressure steam turbine cylinder is made. The analysis of static deformed state of the blade have been carried out in the cyclic symmetry formulation. The influence of the technological gap in the inter-blade shroud connection on the de-formed state of the blade under centrifugal forces has been analyzed.

**Keywords:** deformed state; blades of steam turbines; FEM; computer-aided design.

### Вступ

Надійність та незалежність енергетики будь-якої країни є основою її економічної та промислової стабільності, а отже запорукою її самостійності. Важливою проблемою цієї галузі промисловості України є розробка нових турбомашин, більш економічних та ефективних, а також модернізація існуючих задля збільшення терміну експлуатації. Ця проблема в значному ступені потребує якісного проектування конструкцій та аналізу її міцності.

Робочі лопатки представляють собою найбільш відповідальні конструктивні елементи парової турбіни, завдяки якій відбувається передача кінетичної енергії руху пару до механічної роботи обертання ротору турбіни. Розробці конструкцій лопаток приділяється особлива увага, як з погляду експлуатаційної надійності, економічності, так і забезпечення високої технологічності їх виробництва. При цьому слід відзначити, що лопаткові апарати робочих коліс є одними з най-більш навантажених

елементів, що знаходяться в умовах суттєвих експлуатаційних перевантажень.

Зазначені обставини призводять до особливої уваги до проектування лопаток турбомашин, як з точки зору досягнення найбільшої корисної дії, так із позиції оцінки їх міцності і надійності, а також розробці відповідних конструкційних заходів щодо підвищення цих показників. Питання проектування конструкції, аналізу статичної та динамічної міцності, оцінки рівня вібрацій, а також прогнозування надійності та ресурсу експлуатації лопаткових апаратів турбомашин широко досліджено в сучасних наукових роботах [1-6].

Незважаючи на велику різноманітність типів та конструктивних особливостей сучасних лопаток робочих коліс турбомашин всі вони мають спільні ознаки, що дозволяють провести певну уніфікацію та за-пропонувати систему автоматизованої побудови їх моделей. Така система дозволяє полегшити роботу інженерів, що супроводжується з необхідністю побудови великої кількості моделей при проведенні робіт з модернізації лопаткових апаратів або при

пошуку більш раціональних конструктивних рішень для нових перспективних лопаток.

Крім цього слід відзначити, що в реальних конструкціях завжди існують відхилення геометрії від проектних креслень. Недосконалості технологічних операцій по монтажу лопаток на диску здатні призвести до суттєвої зміни у поведінці лопаткового апарату та викликати неприпустимо великі рівні концентрації напружено деформованого стану (НДС).

Отже при чисельному дослідженні важливо мати технічні засоби для можливості варіювання геометричними параметрами конструкції. Таким чином, розробка параметричних математичних моделей робочої лопатки та лопаткового апарату, які б дозволяли моделювати лопатки різних типів, а також технологічні особливості між-лопаткових з'єднань є актуальною та важливою задачею.

### Розробка параметричних скінченно-елементних моделей лопаток парових турбін

Однією з найбільш складних задач автоматизованого проектування інженерних об'єктів є створення параметризованих геометричних моделей, які представляють собою структурну основу для подальших алгоритмічних дій спрямованих на

конкретну реалізацію системи САПР. Одним із найбільш відповідальних етапів в рамках процедури параметризації є проведення декомпозиції складного об'єкта чи системи на прості структурні елементи та визначення параметрів кожного з них, а також зв'язків між ними. Для проведення параметризації в роботі була використана мова уніфікованого моделювання UML (Unified modelling language), яка широко використовується при побудові систем автоматичного проектування та в технології програмування. На рис. 1 наведено діаграму класів, що представляє декомпозицію параметричної моделі лопатки на структурні одиниці: перо, бандаж, замкове з'єднання. Наведені параметри кожного із цих об'єктів, а також їх декомпозицію на простіші елементи (деякі з яких є абстрактними і використовуються лише підчас моделювання). Таке представлення дає можливість розділити параметри, які належать до різ-них структурних елементів, провівши таким чином локалізацію змінних у системі, що є важливим із алгоритмічної точки зору. Таким чином, для побудови параметричної моделі потрібно побудувати моделі окремих структурних елементів, а потім провести процедуру їх об'єднання.

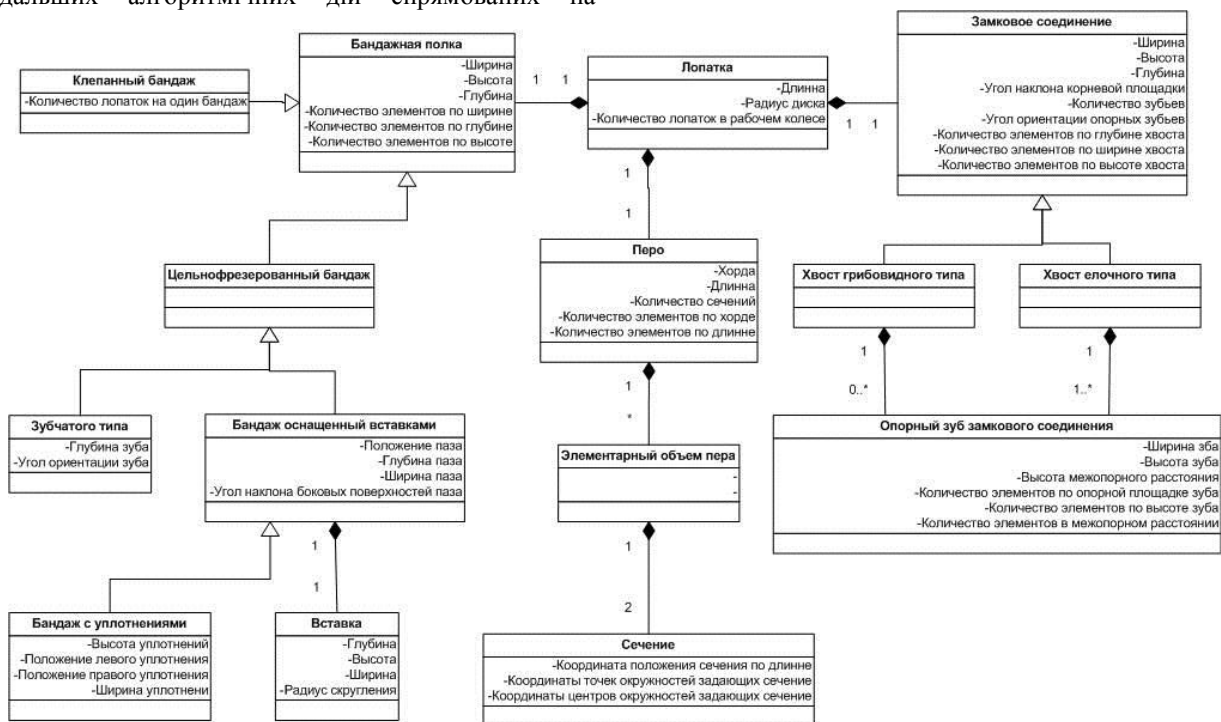


Рис. 1 – Структурна параметрична модель лопатки робочого колеса парової турбіни, що представлена в вигляді діаграми класів UML

Окремих питанням є нанесення СЕ сітки на побудовану геометричну модель. Існує дві основні проблеми у алгоритмізації цієї процедури а) необхідність об'єднання окремо побудованих геометричних об'єктів у одне тіло (таке що має спільні поверхні); б) автоматизація нанесення СЕ сітки на тіло, що має не опуклу форму.

Перша проблема вирішується використанням логічних операцій над геометричними примітивами, в загальному випадку ці операції не завжди можна виконати, але якщо підчас окремого моделювання структурних одиниць виділити та підготувати локальні області, то ця процедура для відносно невеликих змін у параметрах моделі буде стійкою.

Друга проблема нівелюється у тому сенсі, що складний об'єкт під час наведеної схеми моделювання апріорі розділений на прості для нанесення сітки структурні одиниці. Таким чином, виникає критерій для закінчення процедури декомпозиції – *структурна одиниця не потребує подальшого ділення у випадку, якщо на її геометричну модель може бути нанесено автоматичним чином SE сітку*.

Але незважаючи на це залишається проблема об'єднання SE сіток окремих структурних одиниць у загальну SE модель, вирішення якої може бути знайдено шляхом нанесення трикутної (тетраедричної) SE сітки на локальні області, що використовувались під час логічного об'єднання геометричних моделей. На рис. 2 наведено алгоритм побудови SE сітки.

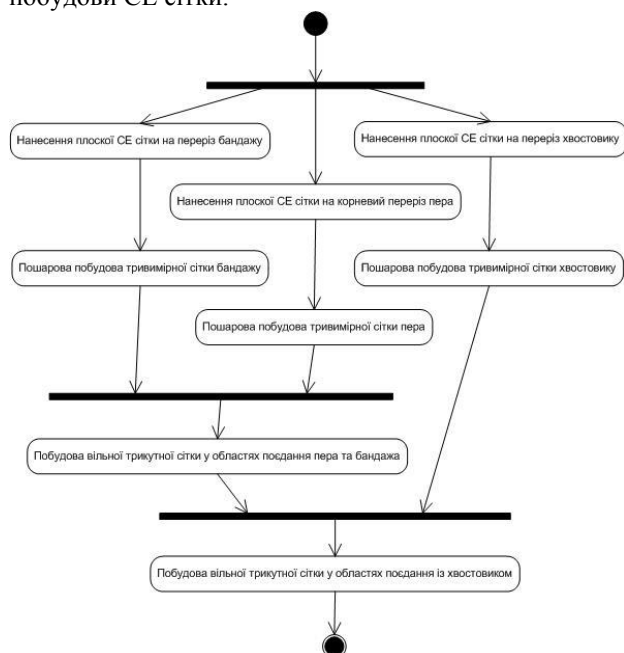


Рис. – Алгоритми нанесення параметричної SE сітки на параметричну геометричну модель лопатки (діаграма діяльності UML)

Приведена методологія дає можливість будувати тривимірні параметричні SE моделі, причому їх параметризація є не лише за геометричними розмірами конструктивних елементів, але і структурна, тобто така, що дає можливість варіювання кількістю деяких структурних одиниць або типом самих зв'язків

### Побудова моделі лопатки третього ступеня циліндру низького тиску парової турбіни

В якості прикладу застосування запропонованого підходу до параметричного моделювання лопаток парових турбін в роботі досліджено лопатковий апарат третього ступеня циліндру низького тиску парової турбіни К310-23.5 виробництва ВАТ «Турбоатом» (м. Харків, Україна).

Робоча лопатка цього ступеня має змінний профіль перерізу по висоті (попередньо закручено pero), а також два між-лопаткових з'єднання:

а) цільнофрезеровану бандажну полицю, що складається з двох роз'ємних елементів: бандажної полиці, що має паз з трапецеїдальним перерізом та вставки;

б) хвостовик, який має грибоподібну форму з трьома опорними зуб'ями.

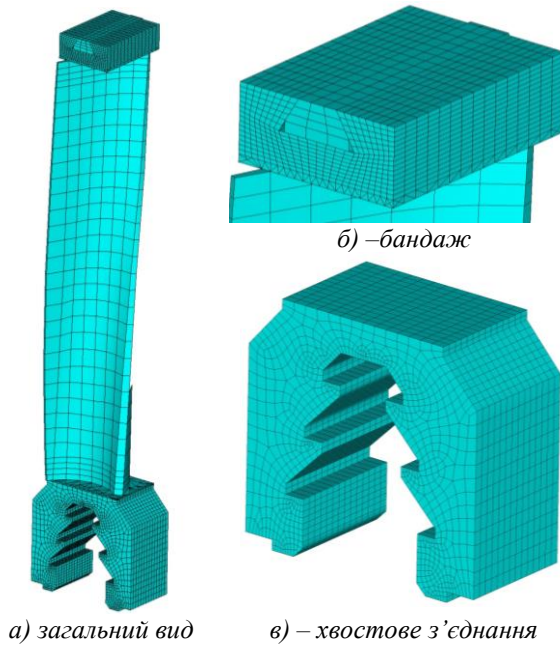
При моделюванні лопаток цього ступеня особлива увага приділяється конструктивним та технологічним особливостям між-лопаткового зв'язку. Лопатки, встановлені на диск, підганяються друг до друга по торцевим поверхням бандажної полиці (Рис. 3, а). Далі у замкнутому на коло бандажному кільцю фрезерується паз трапецеїдальної форми в який встановлюються штифти (Рис. 3, б). Після чого це з'єднання «закатують» шляхом пластичного деформування верхнього краю сторін пазу бандажа.



Рис. 3 – Фотографії етапів зборки лопаток

Ця технологія визначає певні особливості у моделюванні бандажного з'єднання. По-перше, між сусідніми бандажними полицями існує конструктивний зазор, який збільшується під час витягування пера лопатки в полі відцентрових сил (збільшення радіуса призведе до збільшення довжини кола бандажного кільця). Таким чином, з'єднання сусідніх лопаток відбувається виключно через вставки бандажної полиці. По-друге, дія поля відцентрових сил призведе до складної нерівномірної деформації лопатки (неоднорідність витягування пера через масову різницю вхідної та вихідної кромки та часткове розкручення пера лопатки), а отже, як наслідок, неоднорідної контактної взаємодії між бандажною полицею та вставкою, яка працює у протидію зазначеним деформаціям. Ці обставини спонукають до висновку про суттєву напруженість вставки, а також залежність жорсткості між-лопаткового з'єднання від внутрішньої взаємодії вставки та бандажної полиці. Таким чином, модель бандажного зв'язку має складатись з двох окремих тіл: бандажної полиці та вставки

Для проведення варіативних досліджень НДС лопаткового апарату робочого колеса було розроблено параметричну SE модель (рис. 4).



а) загальний вид б) – бандаж  
в) – хвостове з'єднання  
Рис. 4 – Скінченно-елементна модель лопатки робочого колеса третього ступеня

**Дослідження статичних характеристик лопаткових апаратів із роз'ємними з'єднаннями**

В роботі представлені результати розрахунків НДС лопаткового апарату третього ступеня ЦНТ парової турбіни, що знаходиться під дією відцентрових сил. За результатами розрахунку переміщення полки, викликані витягуванням пера лопатки під дією відцентрового навантаження, привели до появи додаткових конструктивних зазорів і взаємної деформації полиці зі вставкою (Рис. 5). Переміщення бандажної полиці й пера лопатки асиметричні щодо радіальної осі в наслідок масової асиметрії пера та великого кута попередньої закрутки лопатки. Так наявність більшої маси з боку вхідної кромки й більшої твердості її «закріплення» у «спинці» пера лопатки забезпечує більше переміщення цієї частини бандажної полиці на десяту частину міліметра.

Поле інтенсивності напружень у лопатковий апарат представлено на рис. 5. Найбільші значення еквівалентних напружень локалізовані в прикореневій області та у зонах зчленування опорних зубів замкового з'єднання. Складна деформація бандажної полиці приводить до концентрації напружень у зонах з малими відносними переміщеннями та в областях кутів конструктивного пазу (рис. 5, б). Подібна ситуація викликана просторовою деформацією вставки, що випробовує складний просторовий вигин. Вона здійснює деформацію згину в радіальному напрямку викликану меншою твердістю її закріплення в області торцевих поверхонь сусідніх бандажних полиць (очевидно що в полі відцентрових сил сусідні лопатки розходяться й поширюють міжбандажний зазор).

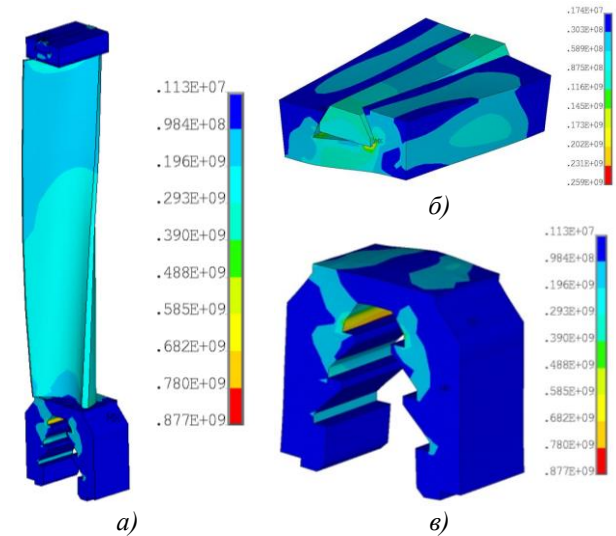


Рис. 5 – Напружений стан циклічно симетричного лопаткового апарату в полі відцентрових сил

Технологічні операції по замиканню лопаток на коло по бандажній полиці мають особливість, яка полягає у принциповій неможливості виконати з'єднання таким чином, щоб сусідні бандажні полиці щільно прилягали одна до одної (через велику кількість лопаток, суттєвий радіус колеса, значну товщину бандажної полиці).

Отже монтажні операції призводять до появи між-бандажних зазорів (статистичні данні по їх замірам щупом вказують, що розміри зазорів коливаються у межах від 0 до 1 мм. Існування цих зазорів змінює жорсткість бандажного кільця. Порівняльні результати відповідних розрахунків (рис. 6) вказують на суттєве збільшення еквівалентних напружень (майже 25%) та локалізацію концентраторів.

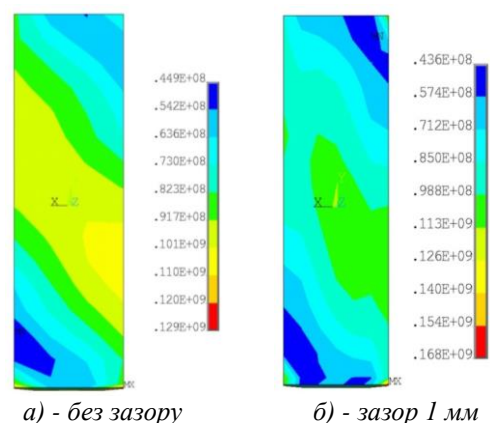


Рис. 6 – Напружений стан вставки

Аналіз результатів розрахунків показує, що при відсутності зазору, вставка має не симетричний просторовий згин, а з ростом зазору спостерігається перерозподіл деформацій у напрямку збільшення кручення вставки з суттєвою локалізацією напружень по її торцевим краям.

**Висновки**

В даній роботі розроблено методологію побудови параметричної СЕ моделі лопаток турбомашин з цільнофрезерованим бандажем, яка дозволяє отримувати СЕ моделі різних модифікацій зазначеного лопаткового апарату. Розглянуто статичний НДС системи та вплив технологічних міжбандажних зазорів на концентрацію напружень.

**Список літератури**

1. **Муравченко, Ф. М.** Актуальные проблемы динамики прочности и надежности авиадвигателей / **Муравченко Ф. М.** // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2004. – № 6 (38). – С. 2-4.
2. **Kaneko, Y.** Development and verification of 3000RPM 48inch integral shroud blade for steam turbine / **Y. Kaneko, K. Mori, H. Ohyama** // *JSME international journal, Seria B*, 2006. – No 49(2). – P. 205–211. – doi: 10.1299/jsmeb.49.205
3. **Zhovdak, V. A.** Statistical dynamics of turbomachine rotor wheels with a technological mistuning / **Zhovdak V.A., Larin A.A., Kabanov A.F.** // *Strength of Material*. – 2008. – No 40. – 577 p. – doi: 10.1007/s11223-008-9075-2.
4. **Pisarenko, G. S.** Issues of Simulation of Turbomachine Blade Vibration / **Pisarenko G. S., Vorob'ev Y. S.** // *Strength of Materials*. – 2000. – No 32. – 487 p. – doi:10.1023/A:1005214501423.
5. **Savchenko, K. V.** Influence of the Orientation of Shroud Contact Surfaces on the Static Stress State of Turbine Rotor Blades / **K. V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I. G. Tokar'** et al. // *Strength of Materials*. – 2014. – No 46. – 493 p. – doi:10.1007/s11223-014-9574-2.

6. **Зиньковский, А. П.** Влияние монтажного натяга на напряженно-деформированное состояние турбинной лопатки и потерю натяга по полкам в процессе эксплуатации / **Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский** // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8 (34). – С. 95–99

**Bibliography (transliterated)**

1. **Muravchenko, F. M.** Actual problems of dynamics, strength and reliability of engines. *Vibracii v tekhnike i tehnologiyah*, 2004, **6** (38), 2-4.
2. **Kaneko, Y., Mori, K., Ohyama, H.** Development and verification of 3000RPM 48inch integral shroud blade for steam turbine. *JSME international journal, Seria B*, 2006, **49**(2), 205–211. doi: 10.1299/jsmeb.49.205.
3. **Zhovdak, V. A., Larin, A. A., Kabanov, A. F.** Statistical dynamics of turbomachine rotor wheels with a technological mistuning. *Strength of Material*, 2008, **40**, 577 p., doi:10.1007/s11223-008-9075-2.
4. **Pisarenko, G. S., Vorob'ev, Y. S.** Issues of Simulation of Turbomachine Blade Vibration. *Strength of Materials*, 2000, **32**, 487p., doi:10.1023/A:1005214501423.
5. **Savchenko, K. V., Zinkovskii, A. P., Tokar', I. G.** et al. Influence of the Orientation of Shroud Contact Surfaces on the Static Stress State of Turbine Rotor Blades. *Strength of Materials*, 2014, **46**, 493p., doi:10.1007/s11223-014-9574-2.
6. **Zinkovskii A. P., Sheremetiev, A. V., Zinkovskii, A. P.** Influence of the technological penetration on the deformed state of turbine blade and loss of contact on the shroud in operation. *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tehnologiya*, 2006, **8** (34), 95–99.

**Відомості об авторах (About authors)**

**Ларін Олексій Олександрович** – доц., к.т.н. доцент. кафедри динаміки та міцності машин, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Oleksiy Larin** – Docent, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Ларін, О. О.** Параметризоване скінченно-елементне моделювання НДС лопаток робочих коліс парових турбін / **О. О. Ларін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 64-68. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.10.

Please cite this article as:

**Larin, O.** Parametric finite element modelling of deformed state of steam turbine blade assemblies. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 64-68, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.10.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Ларин, А. А.** Параметрическое конечно-элементное моделирование НДС лопаток рабочих колес паровых турбин / **А. А. Ларин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 64-68. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.10.

**АННОТАЦІЯ** В статті представлено методика побудови розрахункових скінченно-елементних моделей лопаток парових турбін. Представлено параметризоване описання структури робочої лопатки, виділені зв'язки між її геометричними параметрами. Предложено алгоритми автоматизованого побудови геометричних трьохмерних моделей, які дозволяють автоматизовано наносити розрахункову сітку, накладувати граничні умови та навантаження. В якості прикладу розглянуто побудову моделі робочої лопатки третьої ступені циліндра низького тиску парової турбіни. Проведено аналіз статичного напружено-деформованого стану. Досліджено закономірності впливу наявності технологічних зазорів в бандажному з'єднанні на НДС лопатки в полі центробежних сил.

**Ключевые слова:** НДС; рабочие лопатки паровых турбин; МКЭ; автоматизированное проектирование.

Надійшла (received) 15.12.2016