

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Палькова Сергія Андрійовича «Удосконалення внутрішніх корпусів парових турбін серії К-500-240 шляхом підвищення їх термоміцнісних характеристик», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

1. Актуальність обраної теми, її зв'язок з науковими державними й галузевими програмами.

Для оцінки міцності литого корпусу циліндру високого тиску, який є одним з найбільш відповідальних і дорогих елементів парової турбіни, що лімітує індивідуальний ресурс, необхідно з урахуванням умов експлуатації досліджувати його напружено-деформований стан, який обумовлений високотемпературними неоднорідними температурними полями і внутрішнім тиском парового потоку.

Побудова уточнених моделей і методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій в термодинамічній постановці та достовірна оцінка термонапруженого стану корпусів турбін стає актуальною тому, що в більшості механізмів передача зусиль між деталями здійснюється за допомогою контакту, а їх температура і міцність визначається характером розподілу контактного тиску.

Серед різноманітних постановок і результатів дослідження задач взаємодії, термодинамічні задачі є одними з найбільш складних і найменш вивчених, а тому очевидна необхідність створення ефективних методів їх розв'язання. Основна складність розрахунків полягає в тому, що задача теплопровідності пов'язана з задачею механіки через невідомі умови контакту, оскільки напружено-деформований стан деталей і характер їх взаємодії залежать від розподілу температур, а температурне поле, в свою чергу, визначається умовами контакту. Додаткові труднощі вносять фізична і геометрична нелінійність, а також нестационарність контактних задач зі змінними областями контакту і ковзання.

Таким чином, подальший розвиток розрахункового інструментарію для отримання достовірного напружено-деформованого стану корпусів потужних парових турбін і розробка на основі аналізу результатів розрахунку рекомендацій щодо вдосконалення конструкцій корпусів з метою підвищення їх термоміцнісних характеристик є актуальною проблемою.

Свідченням актуальності розглянутої дисертаційної роботи є її виконання відповідно до держбюджетних тем, де автор є виконавцем окремих розділів:

- «Розроблення теплових схем енергоблоків на суперкритичних параметрах пари для використання на діючих ТЕС України з метою підвищення їх маневреності, надійності, економічності та екологічності» № ДР 0119U101781,
- «Розробка методів підвищення ефективності енергоблоків ТЕЦ за рахунок впровадження парогазових технологій», № ДР 0120U100883.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Дисертаційна робота, обсяг якої 205 сторінок, складається зі вступу, основної частини з шести розділів, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел із 209 найменувань на 19 сторінках та додатки на 10 сторінках. Дисертація містить 6 таблиць та 50 рисунків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації. Визначено предмет та об'єкт дослідження, мету і завдання дослідження. Також у вступі показано наукову новизну отриманих результатів, особистий внесок здобувача, результати апробації матеріалів дисертаційної роботи, зв'язок її з іншими НДР, структуру та обсяг дисертації. Надано відомості щодо практичного використання результатів досліджень.

У першому розділі висвітлено стан проблеми та виконано постановку завдань дослідження. Проведено аналіз матеріалів з розрахунку та проектування корпусів турбін

високої потужності. Особлива увага приділяється класичним та сучасним дослідженням із розрахунку міцності елементів конструкцій в термопружній постановці, з урахуванням контактної взаємодії елементів конструкції, типам граничних умов для реальних процесів конвективного теплообміну, напружено-деформованому стану конструктивних елементів в умовах повзучості.

Поштовхом для перегляду питань розрахунку та проектування корпусів турбін високої потужності стали методики оцінки контактної взаємодії між елементами конструкцій. Закон розподілу контактного тиску істотно впливає на напружено-деформований стан більшості реальних конструкцій, а іноді, наприклад у фланцях горизонтального роз'єму корпусів турбомашин, визначає працездатність конструкції в цілому. У таких випадках виникає необхідність розв'язання контактних задач, де конфігурація і розміри зон контакту, умови взаємодії на них нелінійно залежать від характеру і величини прикладеного навантаження.

Відзначено, що окремим задачам теплопровідності, термопружності та термопластичності, задачам контактної взаємодії в літературі приділяється багато уваги, в той же час бракує робіт, де було б приділено увагу комплексному впливу перерахованих факторів на міцність корпусів турбін з урахуванням температурних навантажень, явищ пластичності і повзучості, термоконтактної взаємодії фланців горизонтального роз'єму в розрахунках. Тому, для вирішення цих проблем необхідна розробка нових інженерних методів і підходів.

У другому розділі представлено результати по удосконаленню методики тривимірних розрахунків напружено-деформованого стану корпусу за допомогою методу скінченних елементів з урахуванням контактної взаємодії елементів конструкції та її верифікації на тестовій фізичній моделі вузла ущільнення трубопроводу. Для доведення адекватності запропонованої моделі та методики було проведено співставлення розрахункових результатів з результатами експериментального дослідження напружено-деформованого стану на фізичній моделі вузла ущільнення трубопроводу.

Експериментальне дослідження НДС вузла ущільнення трубопроводу виконувалося методом тензометрування на моделі, виконаній з органічного скла в масштабі 1:2.5 з дотриманням повної геометричної подібності.

Зіставлення результатів фізичного експерименту і чисельного розрахунку вузла ущільнення трубопроводу показало, що величини прогину (абсолютної деформації гумової прокладки в напрямку дії тиску від кожуха-ущільнювача) і контактного тиску на контактуючій поверхні трубопроводу під верхньою половиною кожуха, як і величини осьових і окружних напружень розтягнення і згинання, в досліджуваних перерізах мають дуже гарний збіг, що підтверджує адекватність запропонованого підходу до розв'язання контактної задачі і знаходження напружено-деформованого стану технічних конструкцій, що складаються з конструктивних елементів складної форми.

Але у якості зауваження слід зазначити, що вираз «дуже гарний збіг» на несе наукового визначення для верифікації. Треба було б зазначити збіг у відсотках по прогинах (12,3%-17,4%) та контактих тисках (4,9%-6,0%).

У третьому розділі приведено порівняльний аналіз запропонованої методики розрахунку і розрахункових методик, що затверджені нормативними документами підприємств-виробників турбінного обладнання і використовуються ними у повсякденній роботі. Це порівняння було виконано на прикладі пружно-напруженого стану елементів внутрішнього корпусу турбіни К-500-240-2 з урахуванням проблем, які виникли в процесі експлуатації даних турбін.

З метою оцінки впливу ряду факторів, що визначають особливості напруженого стану корпусу, які не можна встановити на основі застосовуваних раніше моделей через їх неповноту, наближеність визначення граничних умов та використання фізико-механічних властивостей матеріалів, у роботі за різними методиками проведено уточнене розрахункове дослідження напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу ЦВД, що має складну просторову форму та експлуатується в умовах складного силового та теплового навантажень. Загальним недоліком використання розрахункових плоских моделей є відсутність можливості врахування

патрубків і фланців горизонтального роз'єму корпусу ЦВД. У тривимірній моделі корпусу ЦВД для моделювання через значну складність криволінійних поверхонь корпусу, а також з метою спрощення розмірності ітераційного розрахунку прийнято елемент тетраедричної форми. При створенні СЕ-сітки використовувався елемент об'ємного напружено-деформованого стану з десятима вузлами і трьома ступенями свободи в кожному вузлі: переміщення в напрямку осей X , Y і Z вузлової системи координат.

У якості зауваження слід зазначити, що доцільно було б у цьому розділі порівняти результати розрахунків по методиці тонкостінних оболонок обертання з розгалуженим меридіаном на осесиметричне навантаження, по двовимірній СЕ моделі корпусу та по тривимірній СЕ моделі корпусу із зазначенням рівнів напружень та їх відхилень.

У четвертому розділі наведено дослідження контактної взаємодії фланців верхньої і нижньої половин внутрішнього корпусу турбіни К-500-240-2 в пружній постановці, як найбільш схильного до впливу явищ релаксації кріплення горизонтального роз'єму. У якості зауваження слід зазначити, що тиск на ущільнюючій поверхні внутрішнього корпусу, отриманий за двома методиками відрізняється у 2-4 рази, при цьому значення тиску, отримані відповідно до методики (ОСТ 108.021.110-84), перевищують ті, що отримані за допомогою запропонованої розрахункової методики. Це потребує пояснень та викликає необхідність співставлення результатів з даними інших авторів та даними експериментів для визначення адекватності запропонованої розрахункової методики.

У п'ятому розділі наведено результати аналізу напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу з урахуванням температурних і пластичних деформацій та термоконтактної взаємодії фланців корпусу. Виконано оцінку міцності і деформації корпусу турбіни при температурних впливах в термопружній та термопластичних постановках.

Розв'язання задачі термонапруженого стану корпусу з урахуванням температурних, пластичних деформацій та термоконтактної взаємодії фланців корпусу, де зв'язок температурної задачі із задачею механіки здійснюється через задалегідь невідомі граничні умови в контакті, оскільки напружено-деформований стан і характер контактної взаємодії залежать від розподілу температурних полів, а температурне поле визначається умовами взаємодії, вимагає удосконалених підходів. Так як задача про розподіл сил та температур між кріпленням і фланцем статично невизначена, то вона розв'язується за умови спільності деформацій. При дії на з'єднання зовнішньої сили до розкриття роз'єму стиснення з'єднаних кріпленням деталей зменшується на стільки, на скільки шпилька розтягується.

Не зрозуміло, який програмний продукт застосовувався при розрахункових дослідженнях. Якщо використовували ANSYS, то отримано інтенсивність умовних пружних напружень (рис.16 автореферату та рис.5.5 дисертації), а не самі значення напружень. Тому не йдеться про розтягнення або стиснення. Викликає питання твердження про те, що значення контактного тиску у переднього краю корпусу, в районі установки обойми переднього кінцевого ущільнення, практично повністю негативні на відміну від результатів, які були отримані в пружній постановці, що свідчить про необхідність врахування пластичних явищ під час дослідження напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу турбіни. Необхідність врахування пластичних явищ обумовлена високим рівнем інтенсивності умовних пружних напружень 2000 МПа та -2000 МПа, що не є адекватним (рис.16 автореферату та рис.5.5 дисертації).

Шостий розділ присвячено аналізу напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу за запропонованою раніше методикою термоконтактної взаємодії фланців корпусу з додатковим урахуванням деформацій повзучості. При цьому використовувалася явна схема Ейлера. Повзучість корпусу обчислювалася з використанням модифікованої часової моделі неявної повзучості зі зміцненням.

Потребує пояснень той факт, що шкала напружень (рис.18 автореферату та рис.6.3-6.6 дисертації) не змінювалася в часі (від 300 год. до 250000-300000 год.). Хоча відомо, що при розв'язанні пластичної задачі напруження з часом зменшуються, тобто напруження в значній мірі релаксують і вирівнюються по товщині корпусу.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації базується:

- на аналізі літературних джерел по даній проблемі, на коректній постановці мети і задач дослідження,
- на використанні сучасних методів дослідження, програмних продуктів та математичного апарату,
- на загальноприйнятих допущеннях і обмеженнях, що є досить правомірними та забезпечують повторювальність результатів з достатньою точністю,
- на правильному формулюванні отриманих висновків.

3. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, наукова новизна результатів дослідження.

Достовірність отриманих наукових результатів роботи забезпечувалась коректним застосуванням математичного апарату для вирішення поставлених наукових задач та підтверджувалась узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами експериментальних досліджень, виконаних за апробованими методиками. Теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних основах теорії теплообміну, гідродинаміки, чисельних методах вирішення задач теплопровідності, міцності, методах ідентифікації теплових та напружено-деформованих процесів.

Наукова новизна отриманих результатів та висновків полягає в тому, що отримала подальший розвиток методологія розрахунку термонапруженого стану внутрішнього корпусу парової турбіни в тривимірній пружно-пластичній постановці з урахуванням повзучості і термоконтактної взаємодії елементів конструкції, що дозволило в порівнянні з існуючими підходами більш точно розраховувати розподіл контактного тиску на взаємодіючих поверхнях.

За рахунок застосування приведенного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу отримав подальший розвиток підхід до тривимірного моделювання термозатяжки кріплення горизонтального роз'єму корпусу, що дозволило більш точніше врахувати зміну геометрії елементів корпусу в наслідок теплових навантажень.

Запропоновано новий підхід до експериментального визначення контактного тиску, в якому використовуються непрямі вимірювання прогину ущільнювача в залежності від прикладеного зусилля в кріпленні, що дозволяє отримати локальні чисельні характеристики контактної взаємодії.

В результаті узагальнення розрахункових даних напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу парової турбіни отримані нові результати впливу геометричних параметрів елементів корпусу на концентрацію напружень в елементах конструкції, що дозволяє розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкції корпусу.

4. Рекомендації з використання та практична значимість отриманих результатів дослідження

Практична значимість отриманих результатів дослідження полягає в тому, що розроблено алгоритм розрахунку контактної взаємодії фланців горизонтального роз'єму корпусу з урахуванням теплообміну між дотичними поверхнями. Розроблено рекомендації щодо зниження термічних напружень у внутрішньому корпусі турбіни за рахунок зміни його геометрії. Результати дисертаційної роботи використані для удосконалення конструкції внутрішнього корпусу ЦВТ турбіни К-540-23.5 виробництва АТ «Турбоатом».

5. Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях

В опублікованих працях здобувача достатньо повно викладені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Основні результати дисертації представлено у 18 наукових працях, серед яких 7 статей, в тому числі 6 – в журналах і збірках, внесених в перелік спеціалізованих видань України, де можуть публікуватися результати дисертаційних робіт, 1 – в журналі, індексованому в наукометричній базі Scopus, 11 робіт – тези та матеріали доповідей наукових конференцій (включаючи міжнародні).

Дисертація і автореферат написані відповідно до вимог к науково-технічним текстам. Автореферат і висновки повністю відповідають основному змісту роботи.

Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на наукових форумах та конференціях:

- Конференції молодих вчених та спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» (м. Харків, 2010–2014 рр.);
- XIV та XVII міжнародні науково-технічні конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання» (м. Харків, 2012, 2019 рр.);
- Міжнародна науково-практична конференція «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС» (м. Київ, 2012 р.),
- 11-тий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2013р.),
- XII Міжнародних молодіжних науково-технічних читаннях ім. А. Ф. Можайського (м. Запоріжжя, 2019 р.);
- II Міжнародній науково-технічній конференції "Динаміка, міцність і моделювання в машинобудуванні" (м. Харків, 2020 р.).

6. Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. У першому розділі вираз «Закон розподілу контактного тиску істотно впливає на НДС взаємодіючої пари в більшості реальних конструкцій» (стор.39 дисертаційної роботи) викликає питання та потребує пояснень.

Не зрозуміло, чому для визначення граничних умов теплообміну не використані нормативні документи (РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования), де наведені рекомендовані критеріальні рівняння для характерних ділянок корпусів парових турбін.

2. У другому розділі у якості зауваження слід зазначити, що вираз «дуже гарний збіг» на несе наукового визначення для верифікації. Треба було б зазначити збіг у відсотках по прогинах (12,3%-17,4%) та контактих тисках (4,9%-6,0%). Крім того, відсутні дані щодо порівнянь величини осьових і окружних напружень розтягнення і згинання, що викликає певні питання щодо достовірності визначення напружено-деформованого стану технічних конструкцій.

3. У третьому розділі доцільно було б порівняти результати розрахунків по методиці тонкостінних оболонок обертання з розгалуженим меридіаном на осесиметричне навантаження, по двовимірній моделі корпусу та по тривимірній моделі корпусу із зазначенням рівнів напружень та їх відхилень.

4. У четвертому розділі зазначено, що контактний тиск на ущільнюючій поверхні внутрішнього корпусу, отриманий за двома методиками відрізняється у 2-4 рази (рис.4.6 дисертації). При цьому значення тиску, отримані відповідно до методики (ОСТ 108.021.110-84) перевищують ті, що отримані за допомогою запропонованої розрахункової методики. Це потребує пояснень та викликає необхідність співставлення результатів з даними інших авторів та даними експериментів для визначення адекватності запропонованої розрахункової методики.

5. У п'ятому розділі при розрахункових дослідженнях використовували програмний продукт ANSYS, отримано інтенсивність умовних пружних напружень (рис.16 автореферату та рис.5.5 дисертації), а не самі значення напружень. Тому не

йдеться про розтягнення або стиснення. Викликає питання твердження про те, що «значення контактного тиску у переднього краю корпусу, в районі установки обойми переднього кінцевого ущільнення, практично повністю негативні на відміну від результатів, які були отримані в пружній постановці, що свідчить про необхідність врахування пластичних явищ під час дослідження напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу турбіни». Необхідність врахування пластичних явищ обумовлена високим рівнем інтенсивності умовних пружних напружень 2000 МПа та -2000 МПа, що не є адекватним (рис.16 автореферату та рис.5.5 дисертації).

6. У шостому розділі потребує пояснень той факт, що шкала напружень (рис.18 автореферату та рис.6.3-6.6 дисертації) не змінювалася в часі (від 300 год. до 250000-300000 год.). Хоча відомо, що при розв'язанні пластичної задачі напруження з часом зменшуються, тобто напруження в значній мірі релаксують і вирівнюються по товщині корпусу.

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка є завершеним науково-практичним дослідженням.

7. Висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами)

В цілому можна констатувати, що рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, та по змісту відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. На базі узагальнення результатів теоретичних та розрахунково-експериментальних досліджень розв'язана науково прикладна задача розрахунку напружено-деформованого стану внутрішнього корпусу парової турбіни в тривимірній пружно-пластичній постановці з урахуванням повзучості і термоконтатної взаємодії елементів конструкції, що дозволило в порівнянні з існуючими підходами більш точно отримувати розподіл контактного тиску на взаємодіючих поверхнях. Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН до дисертації.

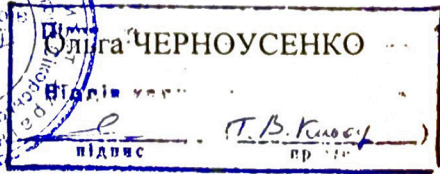
Зважаючи на актуальність теми досліджень, ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертаційної роботи, новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях автора, вважаю, що дисертація Палькова Сергія Андрійовича «Удосконалення внутрішніх корпусів парових турбін серії К-500-240 шляхом підвищення їх термоміцнісних характеристик» відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, що висувається до дисертації, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
в.о. завідувача кафедри теплоенергетичних
установок теплових і атомних електростанцій
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Підпис д.т.н., проф. Черноусенко О.Ю. засвідчую

Вчений секретар

Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО