

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

Беднарської Інни Станіславівни

на тему «Удосконалення підходу до розрахунку напружено-деформованого стану елементів системи паророзподілу атомної електростанції»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 Електрична інженерія

за спеціальністю 144 Теплоенергетика

### **Актуальність теми дисертації.**

Робота присвячена удосконаленню підходу до визначення теплового та напружено-деформованого стану паророзподільної системи атомних електростанцій. Досліджувались газодинамічні процеси в проточному тракті головних паропроводів та їх елементів, а саме, в регулюючому клапані.

Тема дисертаційної роботи є актуальною, оскільки проблема оцінки технічного стану обладнання, прогнозування залишкового ресурсу та продовження строків його подальшої експлуатації на сьогоднішній день не вирішена.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Удосконалено математичну модель дослідження течії вологої пари в головних паропроводах АЕС.

Удосконалено підходи до визначення граничних умов теплообміну при моделюванні течії вологої пари в паропроводах АЕС.

Вперше показано різницю впливу газодинаміки течії вологої пари (за різних способів її представлення при моделюванні) на напружено-деформований стан високотемпературних елементів паропроводів АЕС.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в межах комплексних науково-дослідних робіт № 3545-ЗЕ-БуТЕС від 06.08.2021 р. «Розрахунок ресурсу ротора середнього тиску турбіни блоку №11 для ДТЕК БУРШТИНСЬКА ТЕС», № 37-124-08-22-17927 від 14.06.2022 р. «Оцінка можливості подовження безпечної експлуатації турбоустановки К-1000-60/3000 енергоблоку №2 ХАЕС після пошкодження ротора ЦВТ» та № 5162-ЗЕ-БуТЕС від 20.09.2024 р. «Розрахунок ресурсу ротора середнього тиску турбіни блоку №11 для ДТЕК БУРШТИНСЬКА ТЕС».

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання дослідження виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Беднарської Інни Станіславівни повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Теплоенергетика».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача в розробку підходів, які науково обґрунтовують можливість безпечної експлуатації елементів станції відповідно до вимог енергетичної системи з урахуванням впливу основних чинників, які обумовлюють особливості експлуатації обладнання станції, що в свою чергу дозволить почати оцінку ресурсу обладнання і дати рекомендації по його подальшій експлуатації.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Беднарської Інни Станіславівни є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Стиль викладення доступний для сприйняття з використанням загальноприйнятої термінології.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації складає 147 сторінок, серед них 46 рисунків за текстом, 1 рисунок на окремій сторінці, 5 таблиць за текстом, 4 додатки, список використаних джерел із 99 найменувань на 13 сторінках.

У вступі подається інформація про актуальність обраної теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами, тематиками та планами. Визначаються мета та завдання роботи, що сприяють розкриттю досліджуваного питання. Описуються об'єкт, предмет і методи дослідження.

Також висвітлюється наукова новизна, практична цінність отриманих результатів, особистий внесок автора, апробація результатів, публікації, а також структура й обсяг роботи.

Перший розділ містить огляд літературних джерел, у яких висвітлюються дослідження інших авторів, що займаються подібною проблематикою.

Проведено детальний аналіз конструкції системи паророзподілу енергоблоку №2, що отримує пару від парогенератора №2 Хмельницької атомної

електростанції. Розглянуто основні елементи системи, їхню конструктивну будову, функціональне призначення та експлуатаційні особливості. Особлива увага приділена характеристикам паропроводів, регулюючих і стопорних клапанів.

Проаналізовано наукові джерела, присвячені дослідженню напружено-деформованого стану обладнання електростанцій, зокрема, елементів паророзподілу. Розглянуто сучасні методи моделювання та розрахунку напружено-деформованого стану енергетичного обладнання.

Другий розділ присвячений вибору та обґрунтуванню математичної моделі, що описує газодинамічні процеси в системі паророзподілу атомної електростанції. Обрано методику дискретизації розрахункової області, розглянуто схеми дискретизації, підходи до побудови розрахункових сіток та критерії їхньої якості, що забезпечують точність чисельного моделювання. Сформовано математичну модель і обрано чисельний метод математичного моделювання тривимірної стаціонарної течії в'язкої перегрітої пари, що базується на використанні осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса в поєднанні з напівемпіричною моделлю турбулентності  $k-\omega$  SST та методу рішення на базі кінцевих об'ємів.

У третьому розділі для перевірки адекватності та доцільності використання представленого розрахункового методу порівнювались наружено-деформовані стани стопорного клапана циліндра середнього тиску турбіни К-200-130.

На основі отриманих даних виконано розрахунок напружено-деформованого стану клапана ЦСТ турбіни К-200-130, проаналізовано розподіл напружень і деформацій у його конструктивних елементах. При порівнянні результатів саме проведений комплекс числових експериментів по визначенню газодинаміки клапана дозволив запропонувати гіпотезу обґрунтування виникнення деградації внутрішніх поверхонь корпусу клапана з виникненням зон тріщеноутворення.

У четвертому розділі представлено чисельне дослідження газодинамічних процесів у паророзподільній системі енергоблоку №2 Хмельницької АЕС.

З огляду на високі вимоги до потужностей ЕОМ і значну тривалість розрахунків, було прийнято рішення досліджувати тільки окремі ділянки одного паропроводу, які однаково присутні на кожному з чотирьох. Також було враховано лінійну зміну параметрів пари на прямих ділянках паропроводів.

Прийнята міра дала можливість не тільки скоротити час і ресурси, що витрачаються на дослідження повної задачі, але і є досить надійним методом прогнозування зміни тиску, температури та швидкостей на схожих ділянках паропроводів. В якості об'єкта дослідження обрано проточний тракт паропровода №2 від парогенератора №2, включаючи стопорно-регулюючий клапан циліндра високого тиску турбіни К-1000-60/3000 ХАЕС.

У п'ятому розділі досліджено напружено-деформований стан регулюючого клапана паропроводу №2 енергоблоку №2 циліндра високого тиску турбіни К-1000-60/3000 Хмельницької АЕС. Основна увага приділена комплексному аналізу

впливу газодинамічних і теплових процесів на напружений стан конструкції клапана, що в подальшому дозволить оцінити його надійність та довговічність.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені у 9-ти наукових працях, зокрема, 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття опублікована за результатами міжнародної науково-практичної конференції, 4 тези доповідей в збірниках праць міжнародних науково-практичних конференцій.

Тематика і наповнення наукових статей, в яких здобувач у якості співавтора приймав участь, свідчить про високий науковий рівень публікацій здобувача.

Більшість наукових результатів, рекомендацій та висновків, наведених в дисертаційній роботі, отриманні здобувачем особисто в період з 2018 по 2025 рік. Виконано аналіз будови та особливостей експлуатації головних паропроводів АЕС, літературний огляд проблем підходів до розрахунку граничних умов теплообміну за критеріальними рівняннями. Проведено аналітичний огляд використання математичного моделювання при розрахунках на напружено-деформований стан енергетичного обладнання. Поставлено задачу дослідження. Вдосконалено розрахункову модель газодинаміки руху пари в клапанах і паропроводах турбіни К-1000-60/3000. Показано різницю впливу газодинаміки течії вологої пари (за різних способів її представлення при моделюванні) на напружено-деформований стан високотемпературних елементів паропроводів АЕС.

Основний етап розрахунків і моделювання виконано у співавторстві з науковим керівником Риндюком Дмитром Вікторовичем.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

На стр. 25 Захист планується зі спеціальності теплоенергетика, а розділ літературного огляду присвячено проблемам атомної енергетики.

На стр. 36 Формула (1.1) має бути орієнтована по центру сторінки.

Стр. 38 – дуже низька якість формул (1.2) і (1.3). Всі формули розташовані не по центру сторінки.

Стр. 47. Вважаю завим абзац: «Оскільки рівняння, що описують рух робочого середовища є досить складними...». Оскільки вище було сказано, що з-за складності математичного опису течії використовуються методи RANS.

Стр. 50. В відкритих джерелах приведено, що універсальна газова стала становить 287,2 кДж/кг, а не 287,04 кДж/кг.

Стр. 56 – оскільки на стр. 47 обґрунтували застосування RANS, навіщо знов повертатись до DNS?



Стр. 56 – назва рисунка 2.1 повинна бути по центру сторінки.

Стр. 75 – є русизм: потрібно замінити «форму записи» на «форму запису».

Стр. 78 – назва рисунка 3.1 повинна бути по центру сторінки.

Стр. 99 – граматична помилка в словосполученні «стопорно-регулюючий».

Стр. 113 в таблиці 5.1, область IV записано «площа теплового потоку», а потрібно «густина теплового потоку».

Стр. 114 і 115 – не дано пояснень щодо зменшення температури на зовнішній поверхні клапану в області звуження перерізу.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

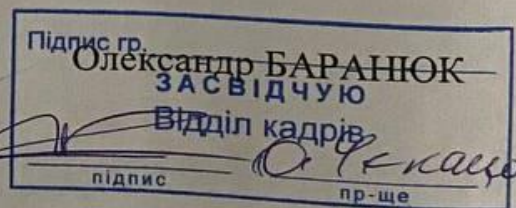
### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Беднарської Інни Станіславівни на тему «Удосконалення підходу до розрахунку напружено-деформованого стану елементів системи паророзподілу атомної електростанції» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувачка Беднарська Інна Станіславівна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика.

### **Рецензент:**

доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
кандидат техн. наук, доцент



«12» червня 2025 року