

ВІДГУК

офіційного опонента 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.

Забезпечення сталого попиту на електроенергію не можливо без модернізації та збільшення генеруючих потужностей України. Основними факторами покращення роботи електричних мереж та обладнання мають бути надійність енергопостачання, безпека, енергоефективність і мінімізація негативного впливу на екологічний стан навколишнього середовища.

На даний час базовими генеруючими потужностями електроенергії в ОЕС є теплові та атомні електричні станції. Найбільше енергії виробляється атомними електричними станціями (51 %), на другому місці ТЕС та ТЕЦ, які виробляють 36 % енергії від загального виробітку.

Наразі для ТЕС та АЕС є актуальною проблема оцінки технічного стану обладнання, прогнозування залишкового ресурсу та продовження строків його подальшої експлуатації.

Згідно з останнім прогнозом Міжнародного енергетичного агентства, частка ядерної енергетики в задоволенні попиту на первинну енергію значно зросте – з 6% у 2009 році до 7% у 2035 році. Споживання первинних енергоресурсів зросте з 81% у 2010 році до 75% у 2035 році.

Враховуючи вимоги для безпечної подальшої роботи електростанцій необхідно розробити розрахункові підходи, які науково-обґрунтовують можливість подальшої експлуатації елементів станції відповідно до вимог енергетичної системи з урахуванням впливу основних чинників, які обумовлюють особливості експлуатації обладнання станції. Методи що розробляються, мають давати фактичну оцінку ресурсу обладнання та зазначити рекомендації по подальшій експлуатації.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

У дисертаційній роботі вирішується важлива науково-технічна проблема, що полягає в удосконаленні підходу до розрахунку напружено- деформованого стану елементів системи паророзподілу атомної електростанції.

Виконано аналіз будови та особливостей експлуатації головних паропроводів АЕС. Проведено детальний літературний огляд визначення граничних умов теплообміну з використанням критеріальних рівнянь. Досить широко виконано аналітичний огляд використання математичного моделювання при розрахунках на напружено-деформований стан енергетичного обладнання. З урахуванням існуючого науково-технічного стану поставлено задачу дослідження. При розв'язанні задачі 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. Необхідно звернути увагу, що постановку задачі, створення геометричної моделі, проведення числових експериментів, графік падіння тиску на кожному із чотирьох паропроводів по характерних точках на розрахункових схемах було виконано з використанням сучасних методів моделювання. Створено геометричну модель стопорно-регулюючого клапана з турбіною К-1000-60/3000 енергоблоку № 2 Хмельницької АЕС для проведення комплексу числових експериментів, виконана валідація отриманих результатів. Обчислено графік зміни тиску по довжині паропроводу. Особливістю роботи є вперше враховано парове сито в регулюючому клапані з турбіною К-1000-60/3000 енергоблоку № 2 Хмельницької АЕС.

Дисертаційна робота виконана 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».

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Удосконалено математичну модель дослідження течії вологої пари в головних паропроводах АЕС;
2. Набули подальшого розвитку підходи до визначення граничних умов теплообміну при моделюванні течії вологої пари в паропроводах АЕС;

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

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розробці та рекомендації до впровадження комплексного підходу до розрахунку теплового та напружено-деформованого стану елементів енергетичного обладнання для подальшого прогнозування залишкового ресурсу, зокрема:

- на основі проведених досліджень запропоновано підхід до визначення газодинаміки та умов теплообміну вологої пари та основного металу паропроводів АЕС;

- визначені розподіли швидкостей, температур та тисків в головних паропроводах енергоблоку №2 ХАЕС при протіканні вологої пари (за різних способів її представлення при моделюванні);

- на основі розробленого підходу визначено тепловий та напружено-деформований стан товстостінних елементів паророзподільчої системи, а саме корпусу стопорно-регулюючого клапана турбіни К-1000-60/3000 ХАЕС енергоблоку №2.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Беднарської Інни Станіславівни відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньо- наукової програми «Теплоенергетика», про що свідчить висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Беднарської Інни Станіславівни, наданий кафедрою теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям оцінки довговічності експлуатації енергетичного обладнання.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання в тексті результатів інших вчених супроводжується відповідними посиланнями, посилання на літературні джерела коректні. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, що опубліковані у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою, логічно структурована та доступно викладена. Основний текст підготовлено якісною технічною мовою, з використанням професійної термінології. Наукова робота достатньо забезпечена рисунками та таблицями.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, додатків та списку використаної літератури.

У *вступі* дисертаційної роботи 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.

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел. 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.

За результатами аналізу поставлені такі основні завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертації 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.

В результаті 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.

Третій розділ присвячений дослідженню адекватності та доцільності використання розглянутого розрахункового методу. В роботі порівнювались наружено деформовані стани регулюючого клапана циліндра середнього тиску турбіни К-200-130, тепловий стан розрахований двома способами. Перший визначався граничними умовами теплообміну I-IV роду на основі критеріальних рівнянь. Другий представлений дослідженням газодинаміки

поток, сформованого в проточному тракті регулюючого клапана та впливу структури потоку на елементи поверхні корпусу клапана на основі усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS).

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.

Результатом моделювання є 3-D газодинамічна структура потоку пари, розподіл швидкостей в потоці, температурні поля та розподіли тисків. Аналіз отриманих результатів чисельного моделювання надав можливість досить докладно оцінити вплив геометрії паропроводів на газодинамічні характеристики течії вологої пари.

Перевірка адекватності чисельної моделі і коректності моделювання була проведена шляхом порівняння розрахункових результатів з даними, що контролюються датчиками на ХАЕС. Порівняння результатів дослідження та реальних даних дало задовільний збіг. Середня відносна похибка моделі становить близько 7%. Розроблена імітаційна модель є адекватною і може бути використана для розрахунку параметрів течії пари в паропроводах.

П'ятий розділ присвячено дослідженню 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.

Детально виконано розрахунок газодинаміки регулюючого клапана, визначено особливості руху пари та її взаємодії з внутрішніми поверхнями клапана. Також, для порівняння, розглянуто метод розрахунку граничних умов теплообміну I-IV роду на основі критеріальних рівнянь, що використовується для визначення температурного поля в елементах конструкції.

Аналіз напружено-деформованого стану металу клапана показав, що основні напруження виникають не тільки в місцях кріплення корпусу та сидла клапана, а й у точках контакту сита з внутрішньою поверхнею корпусу. Зона кріплення сита зазнає підвищених механічних навантажень через зміну гідродинамічного опору потоку пари. У порівнянні з моделлю без сита,

максимальні напруження в корпусі клапана збільшилися приблизно на 7–10%, що свідчить про необхідність врахування цього елемента при розрахунках довговічності металу.

У додатках наведено перелік наукових публікацій здобувачки за темою дисертації та акти впровадження результатів на ДТЕК БУРШТИНСЬКА ТЕС, ХАЕС.

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 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.

Публікації Беднарської Інни Станіславівни мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на унікальність згідно з умовами видавництва. Особистий внесок здобувачки до поданих наукових публікацій є вагомим. Публікації охоплюють усі основні результати дисертаційного дослідження.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В першому розділі представлені в роботі розрахункові матеріали сталевих конструктивних елементів паропроводів «свіжої» пари представлені лише назвою марки сталі, без зазначення відповідності нормативним матеріалам, таким чином не можливо однозначно визначити механічні характеристики компоненту.

2. Другий розділ дуже переобтяжений загальною теорією методу скінчених об'ємів, було б більш доцільно звернути увагу на обраний метод для розрахунку: метод контрольних об'ємів (Finite Volume Method) з детальним описом сітки, яка досліджується.

3. В третьому розділі дуже детально представлена розрахункова модель клапана ЦСТ К-200-130, теплові граничні умови, результати теплового та міцнісного розрахунку. Проте інформація про сітку скінчених елементів та метод обраний для розв'язання задачі міцності майже відсутній, тому важко провести аналіз адекватності математичної моделі.

4. Розділи чотири та п'ять необхідно було б розширити інформацією про параметри збіжності для задачі газодинаміки та вказати яким чином інформація отримана в сітках скінчених об'ємів перенесена для сітки скінчених елементів.

Важливо відмітити, 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 14 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.

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри аерогідродинаміки,
Національний аерокосмічний університет
"Харківський авіаційний інститут"
доктор техн. наук, доцент

Олексій ТРЕТЯК

«10» червня 2025 року

ПІДПИС *Олексій Третяк*
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар університету

Ірина Гончарова

