

## **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.**

Сталий розвиток людства неможливий без оновлення та розширення енергетичних потужностей. Світові тенденції вказують на пріоритети: надійність, безпека, енергоефективність і мінімізацію впливу на довкілля.

В Україні основу генерації електроенергії складають атомні та теплові станції. АЕС виробляють понад половину всієї електроенергії, ТЕС і ТЕЦ — ще третину.

З огляду на вичерпання ресурсу енергоблоків АЕС, важливим є питання оцінки їх технічного стану, залишкового ресурсу та можливостей продовження експлуатації.

Потрібні науково обґрунтовані розрахункові методики, що враховують вплив експлуатаційних чинників і дозволяють давати рекомендації щодо безпечної подальшої роботи обладнання.

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

Наукові результати дисертаційної роботи є теоретично обґрунтованими та підтвердженими числовим моделюванням складних фізико-технічних процесів у парових трубопроводах.

Достовірність отриманих результатів забезпечено застосуванням сучасних методів математичного моделювання: використано тривимірну числову модель стаціонарного в'язкого потоку перегрітого пару на основі рівнянь Нав'є—Стокса в середньому за Рейнольдсом (RANS), з турбулентною моделлю  $k-\omega$  SST, реалізованою за методом кінцевих об'ємів. Обґрунтованість результатів підтверджується їх відповідністю відомим закономірностям тепло- та гідродинаміки, а також узгодженістю з результатами попередніх досліджень.

Наукова новизна дисертації полягає у розробленні комплексного підходу до оцінювання напружено-деформованого стану елементів паропровідної системи АЕС, який враховує вплив просторового характеру потоку, турбулентності, локальних втрат тиску та газодинамічних збурень на розподіл напружень. Такий підхід дозволяє точніше оцінювати технічний стан

обладнання, прогнозувати залишковий ресурс і формувати рекомендації щодо продовження строків експлуатації.

Отримані результати мають важливе прикладне значення для підвищення надійності та безпечної експлуатації атомних електростанцій в умовах продовження ресурсу паропроводів.

У роботі проведена верифікація та валідація отриманих результатів, і, таким чином, це підтверджує достовірність запропонованого підходу. Значна частина наукових і прикладних напрацювань вже впроваджена на підприємствах, що підтверджується відповідними актами впровадження.

**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 у 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.

Наукові дослідження були виконані здобувачкою на кафедрі теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом к.т.н., доц. Риндюка Дмитра Вікторовича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо удосконалення підходу до розрахунку напружено-деформованого стану елементів системи паророзподілу атомної електростанції виконано повністю, здобувачка повною мірою оволоділа методологією наукової діяльності.

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

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

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, що підтверджує наявність особистого внеску здобувачки у відповідний науковий напрям.

Аналіз звіту щодо текстових збігів за результатами перевірки дисертації свідчить про те, що робота Беднарської Інни Станіславівни є самостійним дослідженням. Вона не містить ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи неналежних запозичень. Усі використані ідеї, результати й фрагменти текстів інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на джерела.

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

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

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

У **вступі** викладено актуальність теми дослідження, її зв'язок із науковими програмами та планами. Сформульовано мету й завдання роботи, окреслено об'єкт, предмет та використані методи дослідження. Представлено наукову новизну, практичну цінність результатів, особистий внесок автора, апробацію, публікації, а також структуру й обсяг дисертації.

**Перший розділ** містить огляд літератури з досліджень паророзподільчих систем енергоблоків, зокрема системи паророзподілу енергоблоку №2 Хмельницької АЕС. Проаналізовано конструкцію, основні елементи та їх функції, з акцентом на паропроводи й клапани. Розглянуто сучасні методи моделювання напружено-деформованого стану обладнання, проте наголошено на недостатньому вивченні газодинаміки вологої пари та теплообміну в паророзподільчій системі з турбінами К-1000-60/3000, поширеними на українських АЕС. Виявлена потреба вдосконалити розрахункові підходи для підвищення надійності та безпеки експлуатації. Визначено основні завдання дослідження.

У **другому розділі** описується вибір математичної моделі для моделювання газодинамічних процесів у системі паророзподілу з

використанням CFD моделі. Проведено аналіз методів моделювання течій, обрано оптимальний — на основі усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (RANS) з моделлю турбулентності  $k-\omega$  SST Ментера. Описано підходи до дискретизації області, побудови розрахункових сіток і критерії якості, що забезпечують точність. Сформовано модель тривимірної стаціонарної течії перегрітої пари з використанням методу кінцевих об'ємів.

**Третій розділ** присвячений перевірці адекватності запропонованого методу розрахунку напружено-деформованого стану стопорного клапана турбіни К-200-130. Для цього тепловий стан клапана оцінювали двома способами: через граничні умови теплообміну I-IV роду та чисельне моделювання газодинаміки потоку на основі рівнянь Нав'є-Стокса (RANS). Досліджено особливості течії пари, утворення вихорів і вплив температури й тиску на внутрішні стінки клапана. Отримані дані дозволили розрахувати розподіл напружень і деформацій, а також висунути гіпотезу про причини деградації корпусу клапана через утворення тріщин. У висновках підкреслено точність і ефективність методу для оцінки ресурсу й надійності елементів паророзподілу.

**Четвертий розділ** містить опис про чисельне дослідження газодинаміки в паророзподільній системі енергоблоку №2 Хмельницької АЕС. Через обмеження обчислювальних ресурсів моделювали окремі уніфіковані ділянки паропроводів із лінійною зміною параметрів пари, що дозволило суттєво скоротити час розрахунків при збереженні точності. Об'єктом дослідження був паропровід №2 від парогенератора №2 із стопорно-регулюючим клапаном турбіни К-1000-60/3000. Отримано тривимірні поля швидкостей, тисків і температур пари, що детально показують вплив геометрії на газодинаміку потоку. Верифікація моделі порівнянням із фактичними даними ХАЕС підтвердила її адекватність із середньою похибкою близько 7%, що робить її придатною для прогнозування параметрів парових течій.

**П'ятий розділ** присвячений аналізу напружено-деформованого стану регулюючого клапана паропроводу №2 енергоблоку №2 турбіни К-1000-60/3000 ХАЕС з урахуванням впливу газодинамічних і теплових процесів. Проведено розрахунок руху пари та її взаємодії з внутрішніми поверхнями клапана, а також визначено температурні поля двома методами — через теплообмінні граничні умови та моделювання газодинаміки. Особлива увага приділена впливу парового сита на розподіл навантажень. Включення сита в модель підвищує точність оцінки локальних напружень і вказує на потенційні зони втомних пошкоджень. Основні напруження сконцентровані в місцях кріплення клапана та контакту сита з корпусом, при цьому максимальні напруження зростають на 7–10% порівняно з моделлю без сита. Це підкреслює важливість врахування сита для надійної оцінки довговічності клапана.

*Загальні висновки* висвітлюють основні отримані наукові результати, а також містять рекомендації щодо їх практичного застосування.

У *додатках* наведено список публікацій здобувачки та довідки про використання результатів науково-дослідної роботи.

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 публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України.

Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації Беднарської Інни Станіславівни вирізняються високим рівнем якості, пройшли рецензування та перевірку на унікальність відповідно до вимог видавництва. Особистий внесок авторки є суттєвим у кожній із поданих праць. У публікаціях відображено всі ключові результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, зміст дисертації повністю представлений у наукових працях здобувачки.

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

1. Дисертація захищається за спеціальністю 144 теплоенергетика, про те, в огляді літератури є огляд, який стосується проблем атомної енергетики.
2. В тексті роботи зустрічалися незначні граматичні помилки.
3. Не зрозуміло навіщо знов повертатись до DNS на Стр. 56 – оскільки на стр. 47 обґрунтували застосування RANS?

Вважаю, що висловлені зауваження не є значними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну цінність 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.

**Рецензент:**

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



  
Артур РАЧИНСЬКИЙ  
Підпис гр. \_\_\_\_\_  
ЗАСВІДЧУЮ  
Відділ кадрів  
«17» серпня 2025 року  
підпис \_\_\_\_\_