

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Філонової Юлії Сергіївни

**на тему «Обґрунтування надійності тепловідводу від металу вигородки РУ
типу ВВЕР-1000 при деградації її геометрії»**

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 «Електрична інженерія»

за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»

Актуальність теми дисертації

На сьогоднішній день для енергетики України є актуальними роботи з розрахункового обґрунтування можливості експлуатації енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 у понад проєктний термін. Найбільш відповідальними елементами реакторних установок є такі не підлягаючі заміні елементи як корпус реактора, та внутрішньокорпусні пристрої (ВКП). Виходячи з досвіду проведення подібних робіт з розрахункових обґрунтувань надійності обладнання, найсуттєвішим обмежуючим фактором надійної роботи енергоблоків у понад проєктний період є деградація внутрішньокорпусних пристроїв під дією нейтронного випромінювання. Вигородка являє собою внутрішньокорпусний пристрій, однією з основних функцій якого є залізководний захист корпусу реактора від потоку високоенергетичних нейтронів. В процесі експлуатації вона піддається найбільш інтенсивному нейтронному та гамма-опроміненню, внаслідок чого спостерігаються такі феномени як радіаційні енерговиділення за рахунок гамма-розігріву та радіаційне розпухання і повзучість металу. Дослідження впливу випромінювання при високих температурах на аустенітні сталі, з яких виготовлені ВКП, вказують на значну деградацію матеріалу, що, насамперед, проявляється в зміні його міцнісних характеристик. Як наслідок, відбувається радіаційне розпухання і повзучість матеріалу, що викликає значні геометричні зміни внутрішньокорпусних пристроїв, зокрема, вигородки, і може призводити до порушення проєктної геометрії ВКП, їх контакту та порушенню працездатності. Питання появи контакту між ВКП має декілька складових, зокрема, аналіз умов виконання критеріїв міцності в разі контакту, а також аналіз впливу порушення схеми протікання охолоджуючого теплоносія і, як наслідок, зміни умов охолодження внутрішньокорпусних пристроїв, на надійність подальшої роботи РУ в цілому. Останні проведені оцінки прогнозованого моменту контакту вигородки внутрішньокорпусної із шахтою, враховуючи той факт, що більшість українських РУ із ВВЕР-1000 вичерпали свій проєктний термін експлуатації в 30 років, вказують на крайню необхідність вирішення обох складових контактної задачі 24 найближчим часом. Важливим

фактором є неможливість дослідження та вимірювань реальної геометрії вигородки внутрішньокорпусної в гарячому стані. Відповідно, дані щодо реальної формозміни вигородки можуть бути отримані лише за рахунок обґрунтованого аналізу та побудови спеціальних розрахункових моделей, а їх достовірність може бути погоджена даними натурних експериментів щодо геометрії в холодному стані. Загалом, задача полягає у вирішенні питання міцності та аналізу зміни умов охолодження. Раніше, питання міцності розглядалося з метою дослідження можливості контакту та прогнозування самого моменту контакту.

Таким чином, питання щодо збереження надійності охолодження металу вигородки при деградації її геометрії і, як наслідок, утворення не передбачених проєктом перетоків між кільцями вигородки безумовно є актуальним, та важливим для атомної енергетики України.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- Розглянуто питання контактної задачі внутрішньокорпусних пристроїв внаслідок радіаційного розпухання матеріалів ВКП з точки зору зміни умов їх охолодження;
- Запропоновано та застосовано методи обчислювальної гідродинаміки, що дозволяють враховувати просторові особливості протікання теплоносія та процесів теплообміну.
- Розроблено та застосовано методологію вирішення контактної задачі ВКП, що базується як на консервативному поступовому, так і на зв'язаному більш реалістичному мультифізичному аналізі міцності, нейтронно-фізичних розрахунках і теплогідравлічному аналізі охолодження елементів ВКП починаючи від проєктної геометрії і закінчуючи розрахованою формозміненою геометрією.
- Запропоновано підхід із аналізом умов теплообміну для ряду прогнозованих (як гіпотетичних, так і реально передбачуваних) конфігурацій контакту вигородки із шахтою внутрішньокорпусною. Даний підхід дозволив виявити можливі межі порушення умов омивання/охолодження ВКП.
- Запропоновано підхід до аналізу впливу не передбачених проєктом радіальних перетоків в рамках послідовного аналізу процесів деградації. Отримано консервативні межі значень інтенсивності перетоків та проаналізовано їх вплив на зміну умов охолодження вигородки. З'ясовано необхідність виконання зв'язаного мультифізичного аналізу.

– Вперше запропоновано, розроблено та застосовано зв'язаний мультифізичний аналіз процесів деградації геометрії ВКП, що враховує взаємний вплив трьох фізик – нейтронно-фізичних, теплогідравлічних процесів та розрахунку міцності.

– Вперше досліджено взаємний вплив типу «деградація геометрії ВКП – розкриття кілець – поява радіальних перетоків з активної зони – зміна умов охолодження вигородки – зменшення інтенсивності розкриття кілець».

– Розроблені підходи та моделі пропонується застосувати для робіт із оцінки, обґрунтування і перепризначення термінів експлуатації енергоблоків України з реакторами ВВЕР-1000, які підходять до межі строку продовження терміну експлуатації, або, особливо, його перепризначення.

Достовірність наукових результатів обґрунтовується наступними чинниками:

– При виконанні дисертаційної роботи використовувались розрахунково-аналітичні методи з метою аналітичного моделювання активної зони і байпасу теплоносія, та отримання «замикаючих» граничних умов для подальшого розрахункового аналізу. Розрахункові методи чисельного моделювання теплогідравлічних процесів і процесів формозміни геометрії як послідовно, так і зв'язано.

– Застосовувались верифіковані та валідовані розрахункові коди, які використовуються в аналізі безпеки українських АЕС.

– Проведена апробація результатів дисертації на різноманітних науково-практичних конференціях.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання зміни прохідного перерізу кільцевого зазору, а також охолоджуючого каналу, що не передбачено проектом, і, отже, вимагає додаткового аналізу і обґрунтування. Деградація геометрії вигородки призводить до того, що змінюється витрата, в першу чергу, через кільцевий канал, а також утворюються радіальні перетoki теплоносія з АкЗ в охолоджуючі елементи вигородки. Затверджені тема та завдання роботи виконані повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Філонової Ю.С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 143 – Атомна енергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми 46357 Атомна енергетика.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Безпека АЕС».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Філонової Юлії Сергіївни 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. Тобто, має місце дотримання принципів академічної доброчесності.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою з коректним використанням наукових та технічних термінів. Досить складний та великий по об'єму матеріал викладено у логічній послідовності, доступною мовою, зрозуміло та з розкриттям необхідних деталей дослідження.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 163 сторінки, що відповідає типовим показникам дисертаційних робіт.

У вступі обґрунтована актуальність теми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, зазначені мета і завдання дослідження, для досягнення поставленої мети сформульовано відповідні задачі. Зазначені об'єкт, предмет та методи дослідження, наведена наукова новизна та показано практичне значення отриманих результатів. Описано особистий внесок здобувача, наведена інформація щодо апробації результатів дисертації у тому числі кількість публікацій, та наведена загальна інформація щодо структури та обсягу дисертації.

У першому розділі проведено огляд наявних досліджень, пов'язаних з тематикою дисертації. Проаналізовано першопричини і особливості процесів деградації металу внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП), а також найбільш імовірні зміни відносно проєктної геометрії – вичерпання зазорів між вигородкою і шахтою, а також поява не передбачених проєктом РУ ВВЕР-1000 радіальних перетоків через розкриття кілець вигородки. Проведено порівняльний аналіз прогнозованих моментів вичерпання проєктних зазорів, що показує нагальну необхідність обґрунтування можливості подальшої експлуатації енергоблоків при наявності контакту. Зроблено огляд можливостей та досвіду проведення експериментальних досліджень і вимірювання реальної геометрії вигородки після довготривалої експлуатації. Показано наявні обмеження, пов'язані із можливістю проведення вимірювань тільки в «холодному» стані, та зроблено висновок щодо потреби в розробці надійних розрахункових моделей для прогнозування зміни геометрії вигородки з урахуванням миттєвих параметрів радіаційних енерговиділень та температурного стану. Проведено детальний огляд досвіду моделювання температурного поля та радіаційних енерговиділень в елементах ВКП для

подальшого аналізу деградації геометрії. З'ясовано невизначеності, наявні в існуючих підходах, та зроблено висновок щодо відсутності досліджень впливу наявності контакту між вигородкою та шахтою і розкриттям кілець вигородки на зміну умов охолодження елементів ВКП і на подальшу динаміку формозміни, що є визначальним фактором при переоцінці можливості продовження строку експлуатації енергоблоків України. На основі літературного огляду була сформульована коректна мета, завдання, предмет і об'єкт дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню зміни умов охолодження вигородки при деградації її геометрії, а саме її контакті із шахтою та розкритті кілець вигородки і як наслідок – появи не передбачених проєктом радіальних перетоків теплоносія з активної зони реактору, тобто додаткового байпасу активної зони. Запропоновано методологію вирішення задачі дослідження зміни умов охолодження ВКП, що базується на поступовому аналізі, та розроблено універсальну (з точки зору конфігурування та задання граничних умов) розрахункову тривимірну CFD модель охолодження вигородки. Із використанням розробленої моделі проведено серію розрахунків для різних паливних кампаній енергоблоку АЕС України та обрано представницьку кампанію для подальшого аналізу деградації геометрії.

Обґрунтовано вибір п'ятикільцевої моделі вигородки та отримано розрахункове температурне поле для проєктної геометрії ВКП, що використано для подальшого аналізу. З метою дослідження зміни умов охолодження вигородки за наявності її контакту із шахтою запропоновано підхід із розглядом різних можливих конфігурацій контакту. В рамках аналізу розглянуто декілька варіантів контакту, серед яких – проєктна геометрія, шість прогнозованих станів (від цілком гіпотетичного повного контакту до більш реалізованих варіантів перекриття кільцевого зазору за рахунок контакту нижнього/верхнього бортів і їх комбінацій, а також на рівні бортів, що відповідають найбільш енергонавантаженим перерізам вигородки), восьмий – реалістичний на основі попередньої оцінки на міцність для представницької кампанії. На основі розробленого підходу якомога повно проаналізовано всі імовірні стани ВКП при наявності контакту та з'ясовано його вплив на зміну температурного стану основних конструкційних елементів ВКП (вигородки, шахти, шпильок та різьбових тяг). Проведено порівняльну оцінку радіаційного розпухання на основі аналізу цільових функцій радіаційної повзучості – еквівалентних напружень, об'ємних деформацій розпухання та еквівалентних деформацій повзучості.

Досліджено вплив наявності розкриття кілець вигородки і появи радіальних перетоків на зміну умов охолодження ВКП. Проведено оцінку інтенсивності радіальних перетоків за допомогою аналітичної оцінки, та із

застосуванням розробленої CFD – моделі, що дозволяє врахування наявності розкриття. Отримано можливу максимальну межу величини інтенсивності байпасу з активної зони до кільцевого каналу і каналів охолодження вигородки та проаналізовано його вплив на температурний стан вигородки. З'ясовано наявність зворотних зв'язків типу «розкриття – локальна інтенсифікація охолодження – зменшення інтенсивності подальшого розкриття» та зроблено висновок щодо необхідності використання зв'язаного підходу з урахуванням взаємного впливу трьох фізик – нейтронно-фізичному, теплогідравлічному розрахунках та розрахунку міцності.

В третьому розділі представлено опис ключових складових частин нейтронно-фізичного модулю, який є частиною мультифізичного коду для аналізу впливу деградації геометрії вигородки на зміну умов її охолодження. Розроблений модуль складається з трьох основних частин до яких відносяться: інженерний аналіз паливних завантажень енергоблоку, безпосередньо модель транспорту нейтронів та гамма-квантів і параметричний аналіз. Гнучка система налаштувань дозволяє конфігурувати модуль в залежності від типу аналізу, що дає можливість проводити консервативні та реалістичні оцінки з урахуванням можливих радіальних перетоків теплоносія за межі активної зони. Побудована транспортна модель випромінювання, що базується на використанні коду Монте-Карло MCNPX, та дозволяє задання нерівномірності температури та матеріального складу. За допомогою транспортної моделі, а також додатково розробленої підпрограми постобробки результатів розрахунків, реалізовано синтез тривимірних (r - Θ - z) миттєвих та накопичених характеристик випромінювання, які можуть передаватися в теплогідравлічний модуль та модуль розрахунків на міцність.

З метою економії розрахункових ресурсів, що є вкрай важливим при аналізі зв'язаних процесів, розроблена підпрограма генерації набору даних для оцінки впливу деградації геометрії вигородки на функціонали випромінювання в металі вигородки. Для цього оцінені фактори зміни енерговиділення в основних елементах ВКП, які залежать від локальної температури теплоносія та металу (зв'язок з теплогідравлічним модулем), а також від співвідношення метал – вода (модуль розрахунків на міцність).

Четвертий розділ присвячено розробці комплексної зв'язаної мультифізичної процедури оцінки зміни умов охолодження елементів ВКП при деградації їх геометрії з урахуванням наявності зворотних зв'язків типу «розкриття кілець вигородки – поява радіальних перетоків – локальна зміна умов охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття».

Розроблена та впроваджена концепція спряження блоків, що відповідають оцінкам трьох фізичних складових проблеми розпухання – нейтронно-фізичного модулю, теплогідравлічного аналізу та модулю оцінки міцності.

Модифіковано та раціоналізовано модуль теплогідрравлічного аналізу, та, відповідно, розділено його на три складові (субмоделі) – одновимірну теплогідрравлічну модель байпасу активної зони, твердотільну модель основних елементів ВКП, та модифіковану CFD–модель активної зони. Наведено опис кожної складової модулю теплогідрравлічного аналізу та розроблено ефективні інтерфейси спряження окремих модулів.

Застосовуючи розроблену мультифізичну процедуру спряженого аналізу зміни умов охолодження ВКП проведено розрахунковий аналіз деградації геометрії вигородки з урахуванням зворотних зв'язків, пов'язаних з локальним впливом наявності радіальних перетоків на умови охолодження вигородки. В результаті оцінки уточнено значення розкриття кілець на момент 60-ї кампанії, що були отримані в Розділі 2 в рамках виконання послідовного аналізу. Отримані величини зазорів між кільцями мають менші значення, які в середньому на 22% нижчі за результати консервативного послідовного аналізу.

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 13 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus, віднесених до 2 квартилю (Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 10 наукових фахових конференціях.

Зміст та науковий рівень публікацій та доповідей на конференціях висвітлюють значний вклад до наукового дослідження за темою дисертації та відповідають принципам академічної доброчесності, а наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю і висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

При розгляді дисертаційної роботи були виявлені наступні недоліки, питання та зроблені відповідні зауваження:

1) Загальне до розділу 1. В роботі не показано співвідношення ефектів радіаційного розпухання (накопичувальний ефект) та температурного розширення (періодичний ефект з перепадом температур до 280⁰С) з точки зору впливу на формозміну вигородки з часом при роботі реакторної установки на

потужності. Можливо, що у гарячому стані реактора зазори між кільцями зменшуються, або зникають завдяки температурному розширенню металу.

2) Розділ 1, стр.33, Таблиця 1.1 – для покращення розуміння інформації у таблиці доцільно застосувати замість слова «кампанія» - «кампанія №». Також, незрозуміло що таке «АЕС-1», «АЕС-2» і т.д.

3) Розділ 1.3.1, стр.40. У першому буліті зазначено «...наведені значення максимальної температури в вигородці $\sim 488\text{ }^{\circ}\text{C}$...», а у другому «...отримані ще більші значення максимальної температури, що досягає $\sim 460\text{ }^{\circ}\text{C}$...».

4) Розділ 2, стр. 51, пар.3. Не зрозуміло, що таке консервативний варіант й чому його не було реалізовано.

5) Розділ 2, Таблиця 2.1. Чому міжкільцеве розкриття реалізовано у вигляді рівномірної щілини між кільцями вигородки еквівалентною висотою 4 мм, якщо у Розділі 1.2 наведені інші практичні дані вимірювань?

6) Розділ 2, Таблиця 2.2. Чому використовується припущення «Радіальний профіль формується на основі відповідних картограм паливного завантаження.», якщо для обґрунтування безпеки експлуатації реактору у понадпроектний період доцільніше використовувати найбільш консервативну паливну загрузку?

7) Розділ 2, Таблиця 2.2. Чим обґрунтовується припущення «Теплоносій вважається однофазним....», якщо згідно даних Розділу 1.2 на внутрішній поверхні вигородки може відбуватись кипіння теплоносія (температури до $488\text{ }^{\circ}\text{C}$)?

8) Розділ 2.1.3, Рис. 2.12. Чи є в обраних 7 варіантах контакту вигородки та ШВК зазори між кільцями?

9) Розділ 2, Рис. 2.10. Чим викликано пікове значення температур та енерговиділень у вигородці для кампанії №7 в порівнянні з іншими паливними кампаніями? Можливо, такі умови не відтворюються у майбутніх паливних кампаніях.

10) Розділ 3, стр.106, Рис.3.8. На Рис. 3.3 представлено результати аналізу характерної паливної кампанії для енергоблоку ВВЕР-1000 яка складає 300 ефективних діб. Але на рис. 3.8 зазначена нетипова паливна кампанія 353.9 діб і зроблено висновок, що «...у першому наближенні, можна прийняти, що профілі енерговиділення та нейтронної потужності однакові», що не зовсім зрозуміло. Виникає питання щодо тривалості паливної кампанії яка застосовувалась у розрахунках радіаційного розпухання?

11) Розділ 4, стр.127, пар.4. Чи достатньо зазначене значення $\max \left\{ k_{\Pi_i}^{dyn} \right\}$, яке в контексті даної роботи приймається рівним 10^{-3} для кожного часового кроку? Чи виконувався аналіз чутливості?

12) Розділ 4.5 «Висновки до розділу 4». Доцільно було би навести більше кількісних результатів та їх аналіз у зазначеному розділі.

13) Загалом, щодо особливостей оформлення рукопису дисертації, може бути виділено ряд недоліків, врахування яких покращило би якість оформлення та сприйняття основного змісту дисертації. Так, наприклад, доречним було б навести розширений опис рисунку 2.1 в розділі 2, який зображує блок-схему запропонованої методології вирішення поставленої задачі. Також відсутнє розшифрування деяких аббревіатур (наприклад RANS, SST і т.д.).

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

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Філонової Юлії Сергіївни на тему «Обґрунтування надійності тепловідводу від металу вигородки РУ типу ВВЕР-1000 при деградації її геометрії» 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 галузь 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.

Здобувач Філонова Юлія Сергіївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 143 – Атомна енергетика.

Рецензент

Доцент кафедри атомної енергетики
НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
к.т.н., доцент



Сергій КЛЕВЦОВ

« 28 » квітня 20 23 року

Підпис доц. Клевцова С.В.
Засвідчую, перший
Заступник директора
НН ІАТЕ Євген ШЕВЕЛЬ