

ВІДГУК

**офіційного опонента Авраменка Андрія Олександровича
на дисертаційну роботу Філонової Юлії Сергіївни
на тему «Обґрунтування надійності тепловідводу від металу
вигородки РУ типу ВВЕР-1000 при деградації її геометрії»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 143 – «Атомна енергетика».**

Актуальність теми дисертації

Парк діючих атомних енергоблоків України нараховує 15 одиниць, серед яких 12 вже працюють в понад проектний термін експлуатації, що складає 30 років. Обґрунтування подальшої експлуатації є комплексною галузевою задачею, яка базується на науково-технічних та інженерних дослідженнях стану обладнання енергоблоку. Причому із-за великої кількості обладнання енергоблоку стан якого необхідно оцінити, важливою з точки зору оптимізації натурного контролю є попередня інжинірингова оцінка. Аналітичні засоби визначення критеріїв прийнятності (в даному випадку критеріїв міцності та запасів) дають змогу суттєво звузити перелік критичних елементів обладнання/технологічних ділянок енергоблоку, які потребують контролю або заміни. До виконання подібних робіт в Україні, які розпочалися вітчизняними спеціалістами в 2009-2011 роках єдиним лімітуючим об'єктом був корпус реактора, стан якого і визначає можливість подальшої експлуатації. Проте завдяки накопиченому досвіду, а також удосконаленню розрахункових моделей було виявлено, що потенційне обмеження експлуатації може бути спричинене непроєктною зміною геометрії вигородки (відбивача активної зони). Теоретично, це може призвести до того, що змінюються умови охолодження як внутрішньокорпусних пристроїв реактора (ВКП) ВВЕР-1000 та активної зони, так і до порушення механічних умов експлуатації ядерного палива (заклинювання тепловиділяючих збірок).

Дисертаційна робота Філонової Ю.С. присвячена питанням оцінки надійності експлуатації ВКП при зміні проектної геометрії, зокрема оцінки умов охолодження. Однією із функцій вигородки є залізо-водний захист корпусу реактора від потоку високоенергетичних нейтронів. Вигородка в процесі експлуатації опромінюється інтенсивним потоком нейтронів та гамма-квантів, які є причиною розпухання та повзучості металу (накопичений характер) та радіаційних енерговиділень (локальний характер). Інтенсивність і характер зміни геометрії визначається також і температурним полем, причому не тільки абсолютними значеннями (температурне розширення), а й градієнтами величини. Оцінка стану вигородки є комплексною задачею, яка поєднує три фізичні аспекти: радіаційна фізика, теплогідравліка, та

трансцендентна механіка (поєднання пластичності та повзучості з урахуванням зміни властивостей матеріалу під впливом радіаційного опромінення).

Запропоновані в дисертації підходи дозволяють комплексно оцінити поточний стан вигородки, а також виконати прогноз, який враховуватиме як локальні особливості так і накопичувальні величини в умовах непроектної зміни геометрії, що дозволяє більш якісно оцінити кількісні характеристики впливу на умови охолодження не лише металу ВКП, а й активної зони.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. 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 проектної геометрії і закінчуючи розрахованою формозміненою.

2. 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.

3. Запропоновано підхід до аналізу впливу не передбачених проектом 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.

4. 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.

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

Дисертація містить обґрунтовані результати. Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, що сформульовані в дисертаційній роботі, підтверджуються строгими теоретичними викладками, логічними переходами між різноплановим формалізмом. Наведено опис основних фізичних особливостей, що є домінантними в даній роботі. Отримані результати не суперечать наявним відомостям, які були отримані раніше у вітчизняній галузі, а навпаки суттєво доповнюють їх. Результати досліджень пройшли апробацію

на міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях і мають впровадження в галузі атомної енергетики.

Достовірність результатів забезпечується коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням оригінальних підходів і сучасних математичних методів, які реалізовані власноруч чи із застосуванням відомих пакетів спеціалізованого програмного забезпечення.

Практичне значення отриманих результатів в дисертаційній роботі полягає в тому, що вони можуть в подальшому застосовуватися:

- при виконанні робіт оцінки/переоцінки залишкового ресурсу енергоблоків АЕС із реакторами ВВЕР-1000 з урахуванням індивідуальних особливостей експлуатації енергоблоку;
- в якості базового підходу для «проектування» перспективних експериментальних досліджень із холодного стану в гарячий з метою уточнення коефіцієнтів в моделі розпухання;
- для оцінки стану периферійних тепловиділяючих збірок в умовах непроектного радіального перетоку теплоносія;
- розроблені розрахункові моделі та підходи можуть бути основою для вирішення актуальних галузевих задач, що пов'язані із встановленням довготривалих теплогідравлічних та нейтронофізичних умов на зразках – свідках;
- При розробці та уточненні існуючих в галузі теплогідравлічних моделей системного аналізу.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене науково-практичне завдання виконано повністю, а здобувачка повною мірою оволоділа методологією наукової та спеціалізованої інженерної діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

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

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям атомної енергетики, зокрема обґрунтування безпечної експлуатації у понадпроектний термін.

Результати виконаного здобувачкою дослідження свідчать про хороший науковий рівень дисертації та її методологічну цінність, яка направлена на вирішення актуальних галузевих задач, що є значимими на сьогоднішній день для вітчизняної атомної енергетики.

Розглянувши звіт подібності на співпадіння, можна стверджувати, що дисертаційна робота Філонової Ю.С. є оригінальною науковою працею. Наведені результати не містять елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використані ідеї, тексти та результати інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова і 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, планами, темами; зазначені мета і завдання дослідження, наукова новизна та значення роботи.

Перший розділ носить оглядовий характер і присвячений аналізу особливостей процесів деградації металу ВКП, 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. 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 проектної геометрії ВКП, що використано для подальшого аналізу. 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 пост-обробки результатів розрахунків, реалізовано синтез тривимірних $(r-\Theta-z)$ 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 теплогідравлічного аналізу, та, відповідно, розділено його на три складові (суб-моделі) – одновимірну теплогідравлічну модель байпасу активної зони, твердотільну модель основних елементів ВКП, та модифіковану CFD-модель активної зони. Наведено опис кожної складової модулю теплогідравлічного 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.

У висновках наведено узагальнення отриманих у дисертаційній роботі наукових і практичних результатів.

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.

Також результати дисертації були апробовані на 10 міжнародних та вітчизняних науково-практичних 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 висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. В дисертаційній роботі неузгоджена кількість поставлених задач та висновків до дисертації. Для досягнення поставленої мети сформульовано п'ять основних задач, в той самий час висновки мають сімнадцять пунктів, які в першому наближенні складно зв'язати з поставленими задачами.

2. Спираючись на дані таблиці 1.1 не зрозуміла така різниця між оцінками контакту в гарячому стані між вигородкою і шахтою для різних енергоблоків АЕС України. Чи є якісь об'єктивні чинники чи фактори, які визначають такі результати?

3. У другому розділі наведена система рівнянь (2.1), яка описує модель пористого тіла, яке застосовувалося для моделювання теплогідравлічного стану активної зони. В той самий час для визначення гідравлічного опору запропонована форма у вигляді рівняння (2.2) без належного обґрунтування у контексті її застосування для моделі пористого тіла. Чим обумовлена саме така форма визначення гідравлічного опору, яка наведена у залежності (2.2)?

4. Відомо, що за рахунок пошкоджуваності кристалічної решітки аустенітної сталі відбувається зміна механічних властивостей, які необхідно наперед оцінювати. Чи має місце подібний ефект на теплофізичні властивості вигородки, які в цілому є визначальними саме для температурної задачі? Чи врахований цей факт в представлених в роботі розрахунках?

5. В розрахунковій моделі визначення температурного поля металу використовуються CFD методи із застосуванням моделі спряженого теплообміну. В якості замикальної моделі турбулентності використовується SST модель. Чим обумовлений саме такий вибір моделі турбулентності що є визначальною і яким чином застосовується емпірична кореляція (2.5) для інтенсивності теплообміну (наприклад шляхом модифікації вихрової в'язкості біля стінки)? Чи враховано у контактному інтерфейсі через який відбувається теплообмін наявність фракції металу, яка є складовою моделі пористого тіла?

6. В дисертації наявні незначні граматичні та стилістичні помилки, а також незакінчені речення (наприклад, Розділ 4, стр.120, пар.2). Деякі аббревіатури не є розшифрованими, а також надані не всі пояснення щодо складових змінних, які наведені у формулах, хоча далі по тексту дисертації в переважній більшості стає зрозумілим їх тлумачення.

В цілому наведені зауваження направлені на краще розуміння змісту дисертаційної роботи і мають уточнюючий характер.

Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України щодо присвоєння ступеня доктора філософії

Вважаю, що дисертаційна робота здобувачки 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 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.

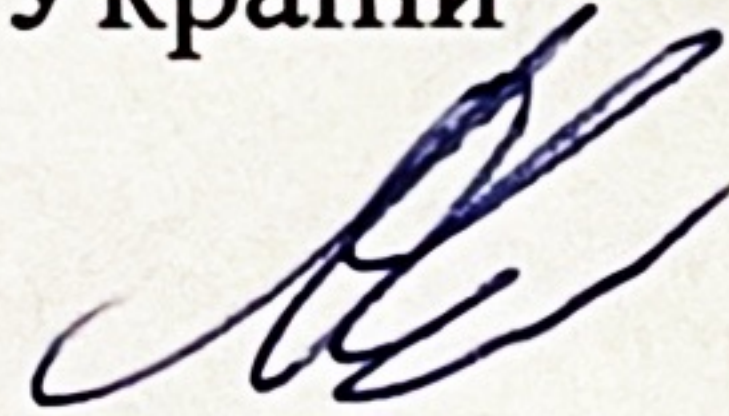
Здобувачка Філонова Юлія Сергіївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 143 – Атомна енергетика.

Офіційний опонент

заступник директора

Інституту технічної теплофізики НАН України

чл.-кор. НАН України, д.т.н, професор



Андрій АВРАМЕНКО



« 1 » травня 20 23 року