

ВІДГУК

офіційного опонента Терещенко Юрія Матвійовича
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

Можливість експлуатації атомних електростанцій у понад проєктний термін є запорукою енергетичної стабільності, що фактично дозволяє отримати часовий запас для акумулювання ресурсів для заміни парку енергоблоків. На відміну від інших типів генерації електричної енергії в атомній галузі питання переоцінки залишкового ресурсу є найбільш науково та технічно навантаженим, оскільки одночасно повинні враховуватися радіаційні, теплогідравлічні та механічні чинники, які діють на обладнання. Інжинірингова підтримка енергоблоків дозволяє оптимальним чином використовувати наявні матеріальні ресурси, оскільки з поміж усього переліку критичного обладнання виявляє найбільш вразливі місця, які потребують натурної діагностики та контролю. Такі науково-практичні роботи стали рушійною силою не лише для розробки методики під наявні (здебільшого комерційні) програмні засоби, а й створення спеціальних програмних продуктів, систем діагностики та вимірювання.

Ядерний реактор та його елементи під час експлуатації знаходяться в різнопланових умовах, які є джерелами локальних, накопичувальних та періодичних навантажень. Активна зона реактора, як джерело високоенергетичного випромінення є причиною локальних особливостей у вигляді об'ємного енерговиділення та накопичувальних – у вигляді радіаційних пошкоджень сталі внутрішньокорпусних приладів (ВКП). Режим роботи енергоблоку впливають на стан матеріалу ВКП та корпусу реактора шляхом виникнення термічних навантажень. Суперпозиція одночасної дії вищенаведених чинників підвищує ймовірність зародження та розвитку тріщин та в цілому деградації геометрії та матеріалу.

В дисертаційній роботі приділено увагу обґрунтуванню надійності подальшої експлуатації вигородки реактора ВВЕР-1000 при непроектній зміні її геометрії під комплексною дією різнопланових за своєю природою фізичних чинників. На основі оригінального мультифізичного аналізу, який виконаний гібридними методами (із застосуванням власних розробок та відомих прикладних програмних пакетів) показано не порушення умов охолодження елементів ВКП, а виявлені особливості зміни геометрії вигородки навпаки є додатковим поліпшуючим чинником. Розв'язана задача та підходи, які запропоновані здобувачкою є вкрай цінними з точки зору практичної інженерної діяльності при оцінці залишкового ресурсу реакторної установки.

Таким чином, дисертаційна робота Філонової Ю.С., присвячена обґрунтуванню надійності тепловідводу від металу ВКП (в першу чергу вигородки) є актуальною для вітчизняної галузі.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. **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 з урахуванням реальних та можливих умов експлуатації.

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

3. Запропоновані напіваналітичні методи розв'язання неізотермічної системи одновимірної теплогідравліки, яка має уніфікацію по комбінуванню граничних умов, що дозволило врахувати наявність радіального витоку теплоносія із тривимірної активної зони реактора.

Наведені викладки в дисертаційній роботі є науково коректними і не мають протиріч із сучасними уявленнями фізичних процесів. Спосіб подання інформації є логічним та зрозумілим. Описова частина дозволяє отримати вичерпне уявлення щодо фізичних особливостей, математичного формалізму та підходів, які застосовувалися для одержання кінцевого результату.

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 удосконаленні існуючих підходів теплогідравлічного аналізу, методики потенційних натурних вимірювань, а також робіт із обґрунтування модернізацій елементів ВКП реакторної установки;
- при визначенні залишкового ресурсу ВКП реактора ВВЕР-1000 та оцінки впливу непроективних чинників на стан активної зони, як загальногалузевої проблеми.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання оцінки надійності роботи внутрішньо-реакторних пристроїв в умовах дії іонізуючого випромінювання для проєктних та понадпроєктних термінів експлуатації виконано повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової 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.

Розглянувши звіт подібності на співпадіння, можна стверджувати, що дисертаційна робота Філонової Ю.С. є оригінальною науковою працею. Наведені результати не містять елементів фальсифікації, копіювання, 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** обґрунтовано вибір теми досліджень, сформульовані мета і задачі дослідження, визначено методи дослідження, висвітлено зв'язок з науково-дослідними програмами та роботами, а також наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок автора, приведені відомості про апробацію результатів дисертації, її структуру та обсяг.

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 проектної геометрії – вичерпання зазорів між вигородкою і шахтою, а також поява не передбачених проектом РУ ВВЕР-1000 радіальних перетоків через розкриття кілець вигородки. Проведено порівняльний аналіз прогнозованих моментів вичерпання проектних 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 внутрішньокорпусними і розкриття 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 сформульовано мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню зміни умов охолодження вигородки при деградації її геометрії, а саме її контакті із шахтою внутрішньокорпусною та розкритті кілець вигородки і як наслідок – появі не передбачених проєктом радіальних перетоків теплоносія з активної зони реактору.

Запропоновано методологію вирішення задачі дослідження зміни умов охолодження ВКП, що базується на поступовому аналізі. З метою проведення зазначеного аналізу 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 обґрунтовано вибір представницької кампанії 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 8 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 буртів і їх комбінацій, а також на рівні буртів, 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, шнильок 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 появи зворотніх 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 розробленої підпрограми пост-обробки 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, передбачена 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 зворотніх зв'язків типу «розкриття кілець вигородки – поява радіальних перетоків – локальна зміна умов охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття».

Запропоновано концепцію 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 (субмоделі) – 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 зворотніх 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 і висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Аналізуючи зведені результати виконання оцінки формозміни ВКП (таблиця 1.1, ст. 33) видно, що оцінки початку контакту суттєво відрізняються

для кожного енергоблоку. Фактично можна виділити дві групи, одна з яких показує, що деградація геометрії не є лімітуючим фактором, а інша група навпаки. Зі змісту дисертації не вдасться однозначно встановити в чому причини такої розбіжності і з чим вони пов'язані? Чи настільки різні умови експлуатації цих енергоблоків, чи можливо застосовуються різні підходи?

2. Відомо, що при номінальній витраті теплоносія через активну зону (16-17 т/с) гідравлічний опір є автомодельним, що також впливає із залежності (2.2) при $Re > 400000$. В цьому випадку взагалі можна обмежитися константою у вигляді повного гідравлічного опору для всієї активної зони. Також залишається відкритим питання щодо інтенсивності поперечного обміну імпульсом та енергією між умовними ТВЗ (особливо в зоні дистанціюючих решіток) і яким чином це враховується у побудованих розрахункових моделях?

3. У другому розділі на рисунку 2.9 та в таблиці 2.3 наведені відомості щодо аналізу збіжності результатів в залежності від дискретизації розрахункової моделі. По тексту дисертаційної роботи вказано, що в якості референтної характеристики збіжності обрано максимальне та середньооб'ємне значення температури, які наведені на рисунку 2.10. В той самий час, на рисунку 2.10 наведені результати аналізу паливних кампаній. Постає питання, наскільки в кількісному плані розрахункова модель є чутливою до дискретизації розрахункової сітки?

4. В дисертаційній роботі оцінена інтенсивність можливого радіального байпасу теплоносія із активної зони. Згідно з результатами максимальна інтенсивність непроектного витоку теплоносія складас від 3% до 6% від номінальної витрати через реактор в залежності від способу оцінки. Наскільки одержана величина є критичною і що може слугувати критерієм прийнятності теплогідравлічної надійності?

5. Чи дозволяє запропонований спосіб аналізу паливних кампаній (параграф 3.1) враховувати тривимірність активної зони? Також постає питання, наскільки запропонований інженерний підхід оцінки витоку нейтронів відповідає типовому аналізу із застосуванням групового дифузійного наближення?

6. З роботи не зрозуміло наскільки суттєвий вклад гамма квантів, що запізнюються у кінцеву оцінку енерговиділення та нейтронних функціоналів (флюєнс, та пошкоджуюча доза)?

7. В дисертації не конкретизовано яким чином врахування зворотніх зв'язків впливає на початок контакту вигородки та шахти, а також вигородки та ядерного палива.

В дисертації наявні незначні граматичні та стилістичні помилки, проте їх наявність не ускладнює розуміння змісту та аналізу отриманих результатів.

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

завідувач кафедри авіаційних двигунів
Аерокосмічного факультету
Національного авіаційного університету
д-т.т.с., професор



Юрій ТЕРЕЩЕНКО

« 16 » квітня 2023 року

Проректор з наукової роботи
та інноваційного розвитку

Олексій ШКУРАТОВ

« 27 » квітня 2023 року