

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора техн. наук, доцента, Маслова О.В.  
на дисертаційну роботу Піонтковського Юрія Федоровича  
«Відновлення енергорозподілу по об'єму активної зони ВВЕР-1000 на основі  
сигналів детекторів прямого заряду»  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих  
енергій

*Актуальність теми дисертації.* Важливою складовою забезпечення стабільної роботи ОЕС України є продовження ресурсу та модернізація енергоблоків АЕС. Продовження термінів експлуатації є загальноприйнятою світовою практикою, станом на 2015 рік у світі експлуатується 438 енергоблоків АЕС, з яких 258 енергоблоків мають вік 30 і більше років. Безумовно це має під собою економічне підґрунтя – інвестиції в будівництво нового блоку та витрати на продовження експлуатації можуть відрізнятись у десятки разів. Крім того слід зазначити, що більша частина коштів, які вкладаються в модернізацію та реконструкцію енергоблоків залишається в Україні. Тому відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року» термін експлуатації енергоблоків має бути продовжений з одночасним підвищенням безпеки їх експлуатації відповідно до положень «Комплексної «зведеної» програми підвищення безпеки енергоблоків АЕС України».

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання: підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом розширення можливості спостереження за активною зоною реактору типу ВВЕР-1000, а саме: вдосконалення системи детектування потоків нейтронного випромінювання в активній зоні ядерної установки шляхом підвищення точності та оперативності визначення параметрів енерговиділення на основі сигналів детекторів прямого заряду системи внутрішньо реакторного контролю; а також шляхом впровадження в експлуатаційну практику реакторів типу ВВЕР сучасних систем СВРК-М2.

Представлено аналіз та систематизацію сучасних розрахункових кодів, що використовуються для нейтронно-фізичних розрахунків АкЗ реакторних установок, виконано порівняння результатів розрахунку даних кодів на базі експериментів з «критичними установками». Виконано розробку методів, алгоритмів та програмного забезпечення для розрахунку процесу

формування сигналу ДПЗ, що надають можливість знизити невизначеність при відновленні лінійного енерговиділення (ЛЕВ) твелів в АкЗ.

Проведено аналіз локальної чутливості ДПЗ та впливу параметрів АкЗ на сигнал ДПЗ. Розроблено моделі АкЗ дослідницького реактора ВВР-М для аналізу оптимального місця розташування збірки експериментальних ДПЗ вітчизняного виробництва в АкЗ дослідницького реактора. Виконано дослідження ДПЗ альтернативної конструкції.

Тому здобутки автора є вкрай своєчасними та актуальними.

**Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**, сформульованих в дисертаційній є високою та базується на всебічному аналізі науково-технічної, нормативної документації, літературних джерел за проблемою роботи, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні надійних методів теоретичних та експериментальних досліджень, розумному співставленні їх результатів, зіставленні і критичному аналізі отриманих результатів, якісному формулюванню отриманих висновків. Особливо потрібно зазначити, розробку процедур валідації та верифікації на основних етапах впровадження результатів дослідження.

**Достовірність наукових результатів дисертації**. При розв'язанні головних та допоміжних задач для одержання наукових результатів автор застосував комплексний підхід, який поєднує теоретичні та експериментальні дослідження, а також матеріали практичних випробувань. Математичний апарат використовувався коректно. Припущення та обмеження правомірні та загальноприйняті.

**Новизна наукових результатів дисертації** полягає в розробці єдиного комплексу науково-обґрунтованих взаємопов'язаних методів і моделей для забезпечення моніторингу за процесами в активній зоні реактору ВВЕР-1000, розробці наукових положень залучення до експлуатаційної практики сучасних методів та засобів визначення енерговиділення в активній зоні ВВЕР-1000. Основна перевага таких моделей полягає в досягненні оптимального балансу безпеки, надійності та економічної ефективності роботи реакторної установки з ВВЕР-1000.

Автором отримані нові наукові знання у вигляді математичних співвідношень для розрахунку сигналу ДПЗ, що дозволяє коректно фіксувати

вплив основних параметрів активної зони реактора, на значення параметрів сигналу ДПЗ, які використовуються при відновленні ЛЕВ в АкЗ; функції, що враховує вигорання ДПЗ та надає можливість аналізувати ефект нерівномірності вигорання емітера та розташування ДПЗ за висотою АкЗ.

Сформульовані принципи вибору практично ідентичного відносно жорсткості спектру нейтронів за енергією у реакторі типу ВВЕР-1000, місця розташування збірки з ДПЗ вітчизняного виробництва ДП «НАЕК Енергоатом» в АкЗ дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАНУ, та розраховано прогнозовані параметри вихідного сигналу ДПЗ у даній збірці

Вперше досліджено локальну чутливість ДПЗ до твелів ТВЗ, до якої його встановлено, та до твелів сусідніх ТВЗ, і вперше встановлено залежності значень локальної чутливості ДПЗ від значень параметрів АкЗ.

Вперше досліджено процес формування сигналу ДПЗ альтернативної конструкції

В роботі наведені результати які отримані вперше і раніше не захищалися.

*Значення для теорії і практики результатів дисертації* обумовлено її науковою новизною, а також впровадженням моделей та методів формування сигналу ДПЗ, які дозволяють фіксувати вплив основних параметрів активної зони, моделі вигорання емітера ДПЗ отриманих в роботі в рамках реалізації «Комплексної «зведеної» програми підвищення безпеки енергоблоків АЕС України» та обґрунтуванні впровадженням «нових» видів палива при формуванні паливних завантажень від різних виробників.

### *Загальна характеристика роботи*

#### *Структура роботи та її основний зміст.*

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 176 сторінок, у тому числі 28 таблиць, 71 рисунок по тексту, список використаних джерел з 112 найменувань.

Оформлення роботи та автореферату відповідає вимогам Наказу МОН України від 12 січня 2017 р. за №40.

У ***Вступі*** обґрунтовано актуальність роботи; показано зв'язок з науковими планами і програмами; визначені: мета, завдання, наукова новизна та практична цінність одержаних результатів, особистий внесок

здобувача; наведено дані про апробацію роботи, публікації за темою дисертації та впровадження основних результатів.

Перший розділ дисертації містить огляд методів і систем для контролю щільності потоку нейтронів, потужності та відновлення енерговиділення в активній зоні під час експлуатації реакторної установки.

Наведено систематизацію детекторів ядерно-фізичними методами вимірювання, діапазонами вимірювання щільності нейтронного потоку, для визначення якого їх використовують та за місцем їхнього розташування в реакторній установці. Проаналізовано їхні основні характеристики, переваги та недоліки.

Наведено аналіз методології визначення ЛЕВ на АЕС з реакторами типу ВВЕР. Зазначено особливості і проблеми сучасних СВРК щодо відновлення параметрів енерговиділення в АкЗ.

В розділі було сформульовано завдання наукового дослідження.

У другому розділі наведені результати валідаційної перевірки модельного підходу для розрахунку параметрів активної зони ВВЕР-1000 на базі критичних експериментів, розрахунку критичності для відпрацьованих ТВЗ ВВЕР-1000 у контейнерах для зберігання відпрацьованого ядерного палива та порівняльного аналізу результатів, отриманих у Монте-Карло кодах. Наведено результати валідації та верифікації розроблених моделей, алгоритмів та ПЗ.

Розглянуто питання обґрунтованого вибору спеціалізованих розрахункових кодів розрахунку критичності для проведення надійних розрахунків. Для валідації та верифікації розрахункових кодів було використано дані експериментів, проведених на установці SF-9. Відповідно до опису установки SF-9 в кодах MCNP та SCALE було створено по 12 моделей із різною кількістю паливних стрижнів і різною висотою сповільнювача і проведено порівняння результатів експерименту з розрахунками. Результати аналізу дозволили обґрунтовано підтвердити можливість використання кодів SCALE і MCNP для проведення оцінки ядерної безпеки систем зберігання ядерного палива.

Також наведено результати валідаційної перевірки в кодах MCNP та SERPENT розрахункової моделі формування сигналу ДПЗ. Метою розрахунків на даних моделях є дослідження впливу параметрів теплоносія на процес активації родієвого емітера під впливом нейтронного потоку. Особлива увага звернута на SERPENT, який не входить до списку

рекомендованих кодів, але його використання пов'язане з використанням SERPENT при розробці вітчизняного ПЗ для СВРК.

Третій розділ присвячений опису результатів розробки розрахункової моделі, що дозволяє досліджувати формування сигналу ДПЗ та вплив різних чинників на цей сигнал, зокрема, положення органів регулювання, концентрації борної кислоти та температури теплоносія

Проведено аналіз роботи СВРК, її функцій, зокрема, функції відновлення ЛЕВ на базі сигналів ДПЗ. Виконано оцінку локальної чутливості ДПЗ та вплив спектральних характеристик нейтронного поля на сигнал ДПЗ. Розраховано відносний внесок у сигнал ДПЗ від ТВЗ та потвельний внесок для твелів збірки, до якої його встановлено. Обґрунтовано, чому при відновленні ЛЕВ необхідно враховувати в перехідній функції не тільки ряд твелів, що оточують канал нейтронних вимірів, в якому знаходяться ДПЗ. Визначено швидкості реакції радіаційного поглинання в об'ємах емітерів ДПЗ при різних параметрах теплоносія в АкЗ, що вказують на залежність сигналу ДПЗ від положення детектора по висоті АкЗ

У четвертому розділі наведені результати розробки методу врахування вигорання емітера ДПЗ при відновленні ЛЕВ в АкЗ. Розроблено розрахункову модель, що дозволяє визначати вигорання емітера в залежності від його місця розташування в АкЗ ядерного реактора. Вперше визначено вигорання ДПЗ за глибиною, а також те, яким чином ефект нерівномірності вигорання матеріалу емітера впливатиме на сигнал ДПЗ. Розраховано ймовірності вильоту електронів на один поглинутий нейтрон в залежності від глибини (по радіусу емітера), на якій відбулася реакція радіаційного поглинання.

Представлено модель, що дозволяє визначати вигорання ДПЗ при заданій потужності ТВЗ та таких параметрах АкЗ, як: температура та концентрація борної кислоти.

Наведено опис та аналіз ДПЗ «альтернативної» конструкції, яка дозволяє зменшити собівартість детектора без зменшення, або навіть покращення його чутливості до детектування нейтронів.

У п'ятому розділі представлено результати розрахунків параметрів нейтронного поля в дослідницькому каналі, що виготовлений для виконання випробувань ДПЗ вітчизняного виробництва з метою вдосконалення його конструкції, в АкЗ дослідницького реактора ВВР-М ІЯД.

Розроблено чисельну модель АкЗ дослідницького реактора ВВР-М у кодї MCNP, включно з каналом в центрі АкЗ та каналом за шаром берилієвих

витискувачів. Проведено дослідження в якому з цих каналів умови опромінення будуть майже ідентичними до АкЗ ВВЕР-1000. Розраховано значення сигналу, який має генеруватися в кожному з 5-ти ДПЗ, у дослідницькому реакторі типу ВВР-М на потужності 4 МВт, та проведено порівняння з експериментальними даними для дослідницької збірки з 3-ох ДПЗ. Порівняння дозволяє стверджувати, що розроблена модель є коректною.

У **висновках** представлені основні наукові і практичні результати дисертації.

#### ***Практичне значення одержаних результатів:***

- розроблено розрахункові моделі формування сигналу ДПЗ, що надають можливість знизити невизначеність при відновленні ЛЕВ в АкЗ у СВРК, які наразі використовуються на АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000;

- результати використано при розробці прикладного програмного забезпечення модернізованої системи внутрішньореакторного контролю;

- запропоновано ДПЗ «альтернативної» конструкції, більш чутливих до нейтронного потоку при зниженні кількості матеріалу ДПЗ - родію;

- результати використовувалися для виконання процедури вибору і обґрунтування відповідного місця розташування збірки ДПЗ в АкЗ дослідницького ядерного реактора ВВР-М.

Результати досліджень впроваджено в СВРК-М2, яка входить до складу АСУ ТП енергоблоків з ВВЕР-1000 АЕС України, що отримали ліцензії на продовження експлуатації у понадпроектні строки.

Практичне використання результатів дисертації підтверджено актами впровадження.

#### ***Повнота викладення результатів дисертації в опублікованих роботах***

Ознайомлення з дисертацією, авторефератом та публікаціями автора дає можливість зробити висновок про достатню повноту публікації отриманих наукових результатів. Основні результати та висновки дисертації опубліковані у 12 роботах, з них 6 у фахових виданнях, у тому числі 2 у виданнях що входять до бази цитування SCOPUS, 6 робот апробаційного характеру в збірниках матеріалів міжнародних або національних наукових конференцій.

### ***Ідентичність змісту автореферату дисертації.***

Зміст автореферату повністю ідентичний змісту та основним положенням дисертації.

### ***До дисертації є наступні зауваження:***

1. Сторінки 49-50. Рівняння (1.7) виведено в припущенні стаціонарного режиму роботи ЯЕУ, але потім робиться висновок про можливість застосування родієвого ДПЗ для контролю нейтронного потоку в перехідних режимах.

2. Замість додатків з текстами програм можливо треба навести більше інформації про особливості використання із застосуванням блок-схем, діаграм.

3. Підрозділ 2.2. Експеримент SF-9 проводився з паливом, яке має збагачення 3,5 %, на жаль, немає аналізу яким чином використовувати результати SF-9 для палива іншого збагачення.

4. Підрозділ 2.3 З точки зору економічних показників консервативний підхід є не дуже гарним. Не проведено аналіз впливу вигорання палива (burnup credit), облік вигорання для США стандартна процедура (як правило застосовується SCALE) і допускається ПНАЕ. Нічого не говориться про нові варіанти паливних циклів зі збільшенням збагачення і вигорання.

5. Підрозділ 2.3 Стосовно аналізу впливу зміни геометричних характеристик ТВЗ для певної конструкції - не ясно чи розглядалися інші варіанти паливних таблеток, наприклад без внутрішнього отвору, з додаванням пластифікаторів у паливну матрицю.

6. Підрозділ 2.3 Не ясно навіщо проводити аналіз для пошкоджених паливних елементів з водою між оболонкою і паливної матрицею. Пошкоджене паливо в ССВЯП не надсилається. Сучасні ТВЗ припускають ремонт з вилученням пошкоджених твелів, тому наведений аналіз в разі відсутності декількох твелів в ТВЗ, з моєї точки зору, є більше затребуваний, але варто було б розглянути варіант заміни твела на імітатор.

7. Підрозділ 2.4 Сторінка 80. А чому при розрахунках не використовувалися найбільш "критичні" розміри визначені в підрозділі 2.3 ?

8. Сторінка 87 в «Висновки» - наведено аналіз не всіх випадків порушень нормальної експлуатації згідно ПНАЕ, про частину таких випадків тільки згадується як про завдання майбутніх досліджень.

9. Сторінка 92. Рис 3.1 немає пояснення позначень.

10. Для розрахунку застосовується схема рис 3.8 з центральним розташуванням емітера а на рис. 3.2 емітер зміщений відносно осі. Не ясно яким чином проводився аналіз впливу такого зміщення і порушення симетрії завдання.

11. На сторінках 107-109 (рис 3.18 і 3.17) проводиться аналіз залежності спектру нейтронів в області ДПЗ від температури теплоносія і концентрації борної кислоти. У тексті автор також вказує про вплив вигоряння ЯП, за рахунок збільшення вкладу реакцій поділу плутонію, в зміну спектру нейтронів, але на жаль не приводить результатів аналізу такого впливу.

12. На стор.112 автор робить висновок «...дані фактори необхідно враховувати при відновленні ЛЕВ, і код MCNP дозволяє це зробити з високою точністю», але не зрозуміло яким чином MCNP дозволяє враховувати відсутність ПЕЛ в сусідніх ТВЗ в реальному часі при роботі ЯЕУ.

13. Рисунки 5.11 і 5.12 ілюструють типовий для ВВР розподіл щільності потоку нейтронів, не ясно чи враховувалося нерівномірність поля нейтронів при моделюванні сигналу ДПЗ в задах розглянутих в розділі 3. Для деяких ТВЗ нерівномірність поля нейтронів по перерізу ТВЗ може бути досить значною.

14. У Підрозділі 4.2 наведено аналіз моделювання роботи ДПЗ для чотирьох паливних кампаній, але не ясно чи враховувалися переміщення ТВЗ по АкЗ.

15. Є ряд зауважень щодо оформлення

- список літератури оформлений із використанням різних стандартів
- у частині рисунків, тільки колір лінії використовується для ідентифікації різних залежностей (наприклад рисунки 7, 8 автореферату)
- розмір деяких рисунків потребує масштабування в електронній версії.
- список використаних джерел містить посилання на «закриті», не публічні звіти, технічні документи і так далі.

Вказані зауваження не відносяться до основних наукових положень дисертації та не впливають на загальну оцінку роботи і її наукову цінність

### ***Висновок***

В цілому, дисертація Піонтковського Ю. Ф. є цілісним завершеним науковим дослідженням, в якому отримано нові наукові результати в області прикладних та суміжних-ядерно фізичних досліджень, що в сукупності



вирішують актуальну наукову задачу підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом вдосконалення системи детектування потоків нейтронного випромінювання в активній зоні ядерної установки, в тому числі ВВЕР-1000, шляхом підвищення точності визначення параметрів енерговиділення на основі сигналів детекторів прямого заряду.

Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладення доказовий, чіткий і зрозумілий. Публікації автора повністю висвітлюють наукові положення і результати дисертації. Зазначення особистого внеску у публікаціях з співавторами зроблено акуратно з виконанням вимог академічної доброчесності.

Автореферат дисертації за змістом та формою відповідає дисертаційній роботі і достатньо повно відображає зміст її основних науково-технічних положень.

Мета роботи, поставлені та розв'язані в ній задачі, викладені основні наукові результати дозволяють зробити висновок про те, що дисертаційна робота відповідає спеціальності 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Таким чином, необхідно зробити висновок, що за актуальності обраної теми, обґрунтованості та достовірності висновків і положень, новизні отриманих результатів та їх науковому і практичному значенню дисертаційна робота Піонтковського Юрія Федоровича «Відновлення енергорозподілу по об'єму активної зони ВВЕР-1000 на основі сигналів детекторів прямого заряду», відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою КМ України від 24 липня 2013р., зі змінами, та вимогам МОН України, а її автор, Піонтковський Ю. Ф., заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Офіційний опонент,

доктор техн. наук, доцент, завідувач  
кафедри фізики Одеського національного  
політехнічного університету

Підпис Маслова О.В. засвідчую,  
секретар Вченої Ради Одеського  
національного політехнічного університету

 О.В. Маслов

 В.І. Шевчук