В І Д Г У К

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Бойка Тараса Георгійович на дисертаційну роботу
Хом'яка Едуарда Анатолійовича

«МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ »,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Актуальність теми дисертаційної роботи

Відомо, що покращення показників ядерної і екологічної безпеки сучасних атомних електростанцій є неможливим без гарантування експлуатаційної надійності тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ). Оболонка ТВЕЛ є початковим бар'єром, який перешкоджає потраплянню продуктів радіоактивного поділу, накопичених всередині тепловиділяючого елемента під час вигоряння таблеток ядерного палива, в довкілля. Герметичність оболонок повинна зберігатися протягом усього терміну роботи ядерного реактора та подальшого зберігання відпрацьованого ядерного палива до моменту відправлення тепловиділяючих елементів на переробку.

Існуючі методи контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, які використовуються для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів, таких як локальна неоднорідність, мікро- та макропори, тріщини, виявляються недостатньо ефективними. З врахуванням того, що структура ушкодженого матеріалу оболонки ТВЕЛ має властивості самоподібності та масштабованості, теорія фракталів може бути обґрунтовано використана для дослідження і контролю якості оболонки ТВЕЛ.

Методи фрактальної геометрії надають практичну можливість визначати місце та розмір пошкоджень на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки, а також відстежувати динаміку зростання дефектів аж до утворення наскрізних тріщин. Базою пропонованого методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ є фрактальні властивості структури матеріалу оболонки, з допомогою яких можна пов'язати розташування, тип і розмір дефектів на поверхні оболонки з оцінкою фрактальної розмірності її матеріалу.

Для ефективного впровадження розробленого методу запропоновано вдосконалити систему контролю ТВЕЛ долученням до неї інформаційно-вимірювального обчислювального модуля виявлення дефектів, в якому відбуватиметься опрацювання даних та їх передача до автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції. Для реалізації методу розроблено алгоритм вимірювальних та обчислювальних операцій з визначення показників фрактальної розмірності.

Отже, одним з найважливіших завдань підвищення безпеки, надійності та ефективності експлуатації АЕС є контроль процесу пошкодження оболонок ТВЕЛ і розробка критеріїв їх розгерметизації в режимі реального часу.

Очевидно, що тема дисертаційної роботи Хом'яка Едуарда Анатолійовича узгоджується з цілям програми розвитку енергетики в рамках Енергетичної стратегії України на період до 2050 року, затвердженої кабінетом міністрів України 21 квітня 2023 р., зокрема в сферах безпеки, енергоефективності і конкурентоспроможності. Тому застосування автоматизованого методу оцінювання якості параметрів ТВЕЛ енергоблоку є актуальним завданням і визначальним фактором забезпечення безпеки та надійної експлуатації АЕС.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, викладених у дисертації

Перелічене забезпечено критичним аналізом літературних джерел, чітким формулюванням мети роботи, коректністю постановки і вирішення завдань дисертації, використанням ефективних сучасних методів дослідження, послідовним викладенням теоретичних та експериментальних результатів, отриманих з використанням: теорій кваліметрії, математичної статистики, аналізу і синтезу складних технічних систем, методів системного та порівняльного аналізу, математичної фізики, оцінки ефективності тощо.

Так, теоретичні дослідження базувалися на фундаментальних принципах фізичного моделювання з метою отримання математичного представлення оболонки ТВЕЛ у вигляді пустотілого циліндра, що дало змогу визначити зміну таких геометричних параметрів, як зовнішній та внутрішній діаметр, товщина і площі зовнішньої та внутрішньої поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ. Застосування рівнянь математичної фізики також дало змогу отримати математичну модель процесу формування кластера з молекул гелію в ушкодженій оболонці ТВЕЛ з урахуванням неоднорідності її структури. Для обґрунтовано вибору значення фрактальної розмірності, як критерію оцінки ступеня розгерметизації оболонки, виконано низку експериментальних досліджень в лабораторних умовах. Підтверджено адекватність теоретичних досліджень щодо вдосконалення моделей ушкодження і деформації оболонки, на основі експерименту з фізичною моделлю оболонки ТВЕЛ. Теорію математичної статистики використано для опрацювання результатів оцінювання.

Загалом, положення роботи Хом'яка Едуарда Анатолійовича є науково обґрунтованими і містять переконливе підтвердження його наукових досягнень.

Основні наукові результати дисертації та їх новизна

В результаті виконаних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача – підвищення надійності та безпеки функціонування АЕС шляхом розроблення нового методу автоматизованого неруйнівного контролю якості

ТВЕЛ енергоблоків з застосуванням теорій фрактально–кластерної геометрії і електропровідності у високочастотному електричному полі.

Найважливішими складовими положень наукової новизни є:

– розроблено нову математичну модель деформації оболонки ТВЕЛ, яка пов'язує структурно–фазові зміни та ушкодження в об'ємі матеріалу з його фрактальною розмірністю, і дає змогу визначати зміну геометричних параметрів по всій довжині зовнішньої і внутрішньої поверхонь тепловиділяючого елемента;

– вперше з використанням математичного апарату теорії фракталів виконано моделювання процесу формування кластера з порожнин в ушкодженій оболонці ТВЕЛ з урахуванням неоднорідності її структури, яке дає змогу визначати час виникнення та динаміку росту тріщини в матеріалі оболонки ТВЕЛ; використовуючи модель у режимі реального часу можна на ранніх стадіях виявляти наскрізні тріщини в оболонках ТВЕЛ;

– розроблено новий метод неруйнівного автоматизованого контролю герметичності, місця розташування, типу і розміру дефекту на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ без його вилучення з тепловиділяючої збірки, в основу якого покладено розвиток розроблених моделей, що враховує залежність фрактальної розмірності на аксіальних сегментах по довжині тепловиділяючого елементу від прикладеної частоти електромагнітного поля та зміни електричного опору оболонки ТВЕЛ в результаті скін-ефекту.

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій дисертації

Достовірність наукових положень дисертаційної роботи підтверджено виваженістю і логічністю теоретичних висновків, коректним застосуванням сучасних методів планування експерименту, експериментальними дослідженнями, ідентифікацією та обґрунтуванням характеру математичних і фізичних моделей, зокрема моделі деформації оболонки ТВЕЛ і моделі процесу формування кластера в ушкодженій оболонці ТВЕЛ з урахуванням неоднорідності її структури. Встановлено, що значення розраховані на основі моделювання неістотно різняться від експериментально виміряних, що свідчить про високу збіжність теоретичних та експериментальних результатів.

Наукові положення роботи також підтверджені участю автора в наукових темах і програмах. Аналіз представлених висновків дає можливість стверджувати, що вони базуються на отриманих наукових результатах.

Всі, поставлені здобувачем завдання під час проведення досліджень, були успішно вирішені, переконливо аргументовані і не залишають сумнівів.

Повнота викладення наукових положень в опублікованих працях

Результати досліджень за темою дисертації викладено у 21 роботі, серед яких 5 статей, що входять до переліку наукових фахових видань України, з них – 1 стаття у науковому виданні, яке входить до наукометричної бази Scopus; 1

стаття (розділ монографії) опублікована в країні ЄС; 3 статті – у наукових фахових виданнях України. Решта праць опубліковані у наукових виданнях, апробаційного характеру, а саме: опубліковано 1 патент на винахід; 5 статей і 10 тез доповідей в збірниках конференцій.

Основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації, повністю відображають основні положення виконаних досліджень і не суперечать висновкам роботи.

Значимість результатів дослідження для науки та практики, рекомендації щодо їх використання

Наукова робота Хом'яка Едуарда Анатолійовича розв'язує важливе науково-прикладне завдання у сфері контрольно-вимірювальної техніки, яке полягає в розробленні нового методу оцінювання якості тепловиділяючих елементів впродовж часу їх експлуатації і до моменту відправлення на переробку. Застосування розробленого методу у штатних системах контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерного реактора АЕС даватиме змогу виявляти місцезнаходження, тип та розмір ушкоджень і дефектів без вилучення тепловиділяючого елемента з тепловиділяючої збірки. Це значно прискорить процес контролю герметичності оболонки на ранній стадії порівняно зі штатною методикою, скоротить час на вантажно-розвантажувальні роботи і загалом сприятиме безпечній та ефективній експлуатації тепловиділяючого елемента в ядерних реакторах АЕС.

Також практичну цінність має інформаційно-вимірювальний блок виявлення та вимірювання параметрів дефектів оболонки ТВЕЛ, який не лише реалізує обчислювальний алгоритм контролю, але й забезпечує опрацювання інформації про ступінь герметичності оболонки в режимі реального часу та її передавання до програмно-обчислювального комплексу автоматизованої системи управління енергоблоком АЕС. Застосування цього блоку дає змогу зменшити похибку вимірювання принаймні у 1,25 рази порівняно з існуючими методами вимірювання в системі контролю герметичності оболонки. А це, в свою чергу, покращить точність та надійність контролю тепловиділяючого елемента і забезпечить більш ефективну експлуатацію ядерних реакторів АЕС.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота також містить ілюстрації і таблиці. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 189 сторінок, з яких 143 сторінки – це основний текст. Список літературних джерел містить 275 найменувань.

У вступі подано загальну характеристику дисертації, її актуальність, мету і задачі дослідження; показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і

темами; визначено предмет, об'єкт та методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення результатів дослідження; представлено особистий внесок здобувача і дані про апробацію результатів та публікації.

Перший розділ роботи присвячено огляду літератури, аналізу існуючих підходів для контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, що застосовуються на всіх водно-водяних енергетичних реакторах, а також проаналізовано основні моделі та методи для штатних систем контролю. Показано, що існуючі методи контролю мають характерні недоліки, які не дають змогу визначати розташування, тип і розміри дефектів та пошкоджень на поверхні оболонки ТВЕЛ. Вказано на необхідності удосконалення систем контролю для дистанційного автоматизованого визначення негерметичного ТВЕЛ без його вилучення з тепловиділяючої збірки ядерного реактора типу ВВЕР-1000.

Другий розділ містить опис методу для системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента з застосуванням фрактально-кластерної геометрії. Для дослідження структури оболонки ТВЕЛ представлено її фізичну модель у вигляді порожнистого циліндра. Удосконалено аналітичні вирази моделей ушкодження та деформації оболонки ТВЕЛ, що дасть змогу виявляти її розгерметизацію на ранніх стадіях ушкодження структури матеріалу, підвищувати точність локалізації дефектних ТВЕЛ і загалом підвищити безпеку експлуатації ядерного реактора під час проведення післяреакторних досліджень. Підтверджено адекватність отриманої вдосконаленої моделі ушкодження оболонки ТВЕЛ збіжністю результатів обчислювального експерименту і теоретичних досліджень.

В третьому розділі подано результати експериментального дослідження ефективності неруйнівного методу оцінювання якості оболонки ТВЕЛ. Обгрунтовано вибір фрактальної розмірності як критерію оцінки ступеня герметичності оболонки тепловиділяючого елемента. Представлено результати експериментальних значень фрактальної розмірності, які відповідають місцю локалізації, різним типам і розмірам дефектів на поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ. Виконано аналіз отриманих експериментальних даних для підтвердження адекватності теоретичних висновків щодо моделей ушкодження та деформації оболонки.

В четвертому розділі представлено практичні рекомендації з використання розробленого методу для систем контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, а саме: удосконалену структурно-функціональну схему системи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ як підсистеми автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку АЕС; інформаційно-обчислювальний модуль визначення дефектів у складі автоматизованої системи оперативного контролю; алгоритм розрахунку показників фрактальної розмірності; методику вимірювання геометричних параметрів ТВЕЛ з використанням сенсорів обчислювального модуля виявлення дефектів оболонки ТВЕЛ, а також

метрологічне забезпечення для експериментальної реалізації розробленого методу.

У висновках сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

Додатки містять копії документів, які підтверджують практичну значимість досліджень автора.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації

Незважаючи на загальну позитивну оцінку роботи варто зазначити, що деякі моменти дисертації можуть бути предметом обговорення і дискусій, а саме:

1. «Результати досліджень ТВЕЛ показали [162 – 165], що найчастіше зустрічаються дефекти, що утворюються в результаті взаємодії оболонки зі стороннім предметами в теплоносії реактора, що є основною причиною розгерметизації ТВЕЛ» (стор. 41-42) Тоді, можливо, доцільно було б в першу чергу досліджувати теплоносій?

2. Якщо внутрішній об'єм ТВЕЛ заповнений гелієм під тиском 2,0 *МПа* (стор. 27), то під час розгерметизації газ повинен виходити у вигляді бульбашок, що нескладно виявити. Тобто задача виявлення розгерметизації ТВЕЛ є тривіальною, чи не так?

3. Фраза « … вивчення та моделювання фізичних процесів на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ, при яких відбувається ушкодженість та руйнування її структури, є актуальним завданням при проведенні післяреакторного контролю ТВЕЛ [45 – 49]» (стор. 10, 1-й абзац), вказує на те, що робота стосується післяреакторного контролю ТВЕЛ. Те саме підтверджує текст на стор. 58. Прохання уточнити, чи дійсно робота стосується післяреакторного контролю ТВЕЛ.

Зауваження до роботи:

1. Якщо підставити дані, так як вони представлені на стор. 141, у формулу 4.9, то отримаємо значення d_{ext}=1,6 *мкм*, а не d_{ext}=5 *мкм*, як зазначено в роботі. Якщо ж припустити, що помилково вжиті знаки +, і всі похибки рівні та дорівнюють 3,5 *мкм*, то тоді сумарна похибка d_{ext}=7,8 *мкм*. Чому так?

2. Графіки на рисунках 3.5 і 3.6 абсолютно ідентичні за різних позначень осей та їх числових значень (на першому графіку h_f – фрактальна висота ТВЕЛ, на другому S_f – фрактальна площа поверхні ТВЕЛ). Як можна це пояснити?

3. Абзаци 2 і 3 на стор. 115 містить численні неточності і незрозумілі техніцизми. Що означає « фіксована щільність електромагнітного випромінювання в порожнині циліндроподібної трубки », « просторовий розподіл електромагнітного струму еволюціонує з частотою ω », « прикладена частота електричного опору (потужності)»?

4. Рисунок 2.3 повторює рисунок 1.7 і є незрозумілою ілюстрацією простору пор, який «… можна представити у вигляді окремих кластерів…, які

при розширенні порового простору, поєднуються і утворять макроскопічні твердотільні системи» стор. 103, 1-й абзац. Що значить твердотільна система?

Кластер не може бути утворений з молекул гелію. Кластер є поєднанням пор в матеріалі, заповнених газом гелієм.

До того ж рисунок 2.3 не можна називати фізичною моделлю, як вказано на стор. 106, 2-й абзац.

5. Поясніть, будь ласка, як отримана формула, що подана на стор. 97, 3-й абзац, $P_{\Sigma} = 1/\sqrt{\omega}$, де згідно опису P – енергія (dim $[P]= L^2MT^{-2}$), а ω -частота. А також формула $P = V^2/R$, де P – енергія, V – об'єм, R – електричний опір, представлена на стор. 98, 2-й абзац.

6. Речення, яке починається на стор. 96 і закінчується на стор. 97, є незрозумілим. «Було проведено експеримент з фіксованою щільністю електромагнітного поля, в результаті співвідношення (2.47) отримали вирази (2.48) і (2.49) для значень P_{ext} та P_{int} :...». Очевидно, також тому є незрозумілим походження формул 2.48 і 2.49.

7. У формулі для закону Ома в диференціальній формі σ - питома електропровідність, а не електропровідність, як вказує автор на стор. 96, 1-й абзац. Питома електропровідність залежить від рухливості і кількості носіїв заряду, а не від геометрії провідника.

8. Оскільки йде мова про фізичну модель оболонки ТВЕЛ (рис. 2.1), то формули, які її описують повинні підпорядковуватись правилам узгодження розмірностей фізичних величин в лівій і правій частині виразу. Аналіз формул 2.6, 2.8, 2.10, 2.12, 2.14 та 2.16 вказує на те, що рівність розмірностей фізичних величин виконується лише в тому випадку, коли значення фрактальних розмірностей, які входять у вказані рівняння, дорівнюють нулеві. Тоді незрозумілим є вклад фрактальних розмірностей у вказані рівняння.

9. Як, підставляючи рівності 2.14 і 2.16 в нерівність 2.4, отримана рівність 2.17 (стор. 84, останній абзац)?

10. На рисунку 1.10 відсутній алгоритм пошуку негерметичного ТВЕЛ, про що йдеться у тексті на стор. 48, 3-й абзац.

11. Нажаль в роботі є різні неточності та помилки, які ускладнюють прочитання і розуміння тексту дисертації, а саме:

- незрозумілою є фраза «протікання срін-ефекту», стор. 6;
- що означає нерівність «частота навантаження << 1 *Гц*», стор. 9, 2-й абзац?
- рисунки розташовані не відразу після першого посилання на них в тексті, наприклад перше посилання на рис. 1.10 розташовано на стор. 48, а сам рисунок на сторінці 53;
- не «ступенева залежність» (стор. 4, останній абзац), а степенева;
- усталеним терміном є «похибка вимірювання», а не «помилка вимірювання», стор. 13, 1-й абзац;

- що означає скорочення ПД на рисунку 1.5; тощо.

Однак, вказані зауваження не мають визначального впливу на наукову новизну та практичну цінність дослідження, а також не впливають на загальну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про відповідність дисертації вимогам Міністерства освіти і науки України

Дисертація Хом'яка Едуарда Анатолійовича "Метод оцінювання якості параметрів тепловиділяючого елемента енергоблоку атомної електростанції" є самостійною завершеною науковою працею, яка повністю відповідає вимогам "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", який затверджений постановою КМУ від 12.01.2022 № 44, а також вимогам щодо оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України № 40 від 12.01.2017.

Робота має внутрішню змістовну єдність, містить сукупність нових наукових положень, теоретичних і експериментальних результатів, що вказує про суттєвий особистий доробок здобувача, а зміст дисертації роботи свідчить про високий рівень кваліфікації автора, як наукового співробітника. Відзначені недоліки і зауваження не впливають на вагомість результатів та їх практичну значимість.

Мета роботи, поставлені та розв'язані в ній завдання, викладені основні наукові результати дають змогу зробити висновок про те, що дисертаційна робота відповідає всім вимогам, а її автор Хом'як Едуард Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 15 - Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Офіційний опонент,
д.т.н., професор, професор кафедри
інтелектуальної мехатроніки та роботики
Національного університету
«Львівська політехніка» Т. Г. Бойко

Підпис Бойка Т.Г. засвідчую
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»,
кандидат технічних наук, доцент Р. Б. Брилинський