Українська інженерно-педагогічна академія

Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах
рукопису

Хом'як Едуард Анатолійович

УДК 621.039.546.3

ДИСЕРТАЦІЯ

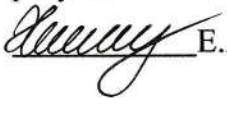
МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Е.А. Хом'як

Науковий керівник: Буданов
Павло Феофанович, кандидат
технічних наук, доцент

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Хом'як Е.А. Метод оцінювання якості параметрів тепловиділяючого елемента енергоблоку атомної електростанції – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка – Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, 2023.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання якості контролю параметрів оболонки тепловиділяючих елементів.

Предметом дослідження метод контролю параметрів тепловиділяючого елемента.

Метою дослідження є оцінка якості контролю параметрів тепловиділяючого елемента шляхом розробки методу автоматизованого неруйнівного контролю із застосуванням теорії фрактально – кластерної геометрії.

Дослідження виконано за допомогою положень фрактально-кластерної теорії, математичного моделювання, чисельних методів аналізу, сучасних інформаційних технологій та методів математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

– вперше, розроблено математичну модель розрахунку формозміни геометрії тепловиділяючого елемента, яка на відміну від відомих, дозволяє при розрахунку реальних геометричних параметрів по всій висоті тепловиділяючого елемента, враховувати структурно – фазові зміни та фрактальні властивості в об'ємі матеріалу оболонки, при впливі ушкоджень на її зовнішню та внутрішню поверхню, на основі застосування теорії фрактальної геометрії;

– вперше, розроблено фрактальну модель ушкодженої оболонки тепловиділяючого елемента, яка на відміну від відомих, дозволяє визначити появу та динаміку зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента, на основі розрахунку часу та швидкості формування загального кластера з молекул газу гелію в наскрізній тріщині із застосуванням

обчислювального апарату фрактально - кластерної геометрії;

– вперше, розроблений експериментальний метод неруйнівного автоматизованого контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, який на відміну від відомих, дозволяє визначити місце розташування, тип та розміри дефекту на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки, без вилучення тепловиділяючого елемента з тепловиділяючої збірки, на основі подальшого розвитку аналітичних виразів удосконаленої моделі ушкодження та деформування оболонки тепловиділяючого елемента та визначення критерію оцінки ступеня розгерметизації у вигляді кількісної величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах по висоті тепловиділяючого елемента, шляхом визначення глибини скін – шару у товщині оболонки, на основі вимірювань електричного опору та потужності, в залежності від прикладеної частоти при використанні скін – ефекту.

Надійність тепловиділяючих елементів, визначається їх здатністю утримувати продукти розподілу ядерного палива, всередині оболонки, не перевищуючи рівень геометричної формозміни, що призводить до важких аварій та катастроф на ядерних об'єктах. Розробка фактичного критерію оцінки ступеня розгерметизації оболонки елементу, є актуальним науково-практичним завданням, яке вирішується, шляхом впровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому представляє собою інформаційно-вимірювальну систему контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елементу.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційних досліджень, їх актуальність, відповідність науковим темам; визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, а також предмет та об’єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, показано зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено дані про апробацію результатів та публікації.

Перший розділ роботи присвячений аналізу штатних систем контролю герметичності оболонки елемента, що застосовуються на всіх водно-водяних енергетичних реакторах, а також проаналізовано основні моделі та методи для штатних систем контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента.

Показано, що методи контролю, не дозволяють визначати місцезнаходження, тип та розміри дефектів пошкодження та руйнування на поверхні оболонки, а також обмежені відсутністю засобів автоматизації та інформатизації.

Встановлені основні умови, яким має відповідати інформаційно-вимірювальна система контролю герметичності оболонки елемента. Проаналізовано найбільш використовувані методи та програмно-апаратні засоби математичного моделювання поведінки та динаміки розвитку ушкодженості та руйнування оболонки елемента, визначені їх переваги та недоліки.

Другий розділ присвячений розробки методу контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, який заснован на врахуванні зміни структурно-фазового стану та фрактальних властивостей матеріалу оболонки.

Розроблена та запропонована фізична (геометрична) модель оболонки елемента, у вигляді геометричної фігури порожнього циліндра, яка дозволяє визначити реальну зміну таких геометричних параметрів, як: зовнішнього та внутрішнього діаметра, товщини та площі зовнішньої та внутрішньої поверхні оболонки по всій топологічній висоті елемента, з урахуванням фрактальних властивостей структури матеріалу оболонки з пошкодженою зовнішньою та внутрішньою поверхнею, на основі застосування апарату фрактальної геометрії.

Показано, що в дослідній фізичній (геометричній) моделі оболонки тепловиділяючого елемента, структура матеріалу, в якій в результаті впливу ушкоджувальних дефектів, утворюються локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини, має специфічні фрактальні властивості: інваріантність, масштабованість та самоподібність, що зумовлює обґрунтування вибору ефективного параметра оцінки структурно-фазової зміни та врахування фрактальних властивостей в об’ємі матеріалу оболонки – величини фрактальної розмірності, яка визначає ступінь заповненості порового простору матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента.

Визначено, що у моделі тепловиділяючого елемента, у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра, зміна величини реальної зовнішньої та внутрішньої площі пошкодженої поверхні та висоти оболонки, перебуває у ступеневій залежності

від зміни величини фрактальної розмірності структури матеріалу оболонки.

Виявлено, що для розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу оболонки, як правило, вводяться обмеження та припущення, щодо геометричних прирощень, які призводять до наближених і неточних характеристик у використовуваних штатних системах контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, оскільки не враховується структурно-фазовий стан структури матеріалу оболонки, отже до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації.

Обґрунтовано, що в якості основи для розрахунків, оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу оболонки, необхідно використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь розгерметизації тепловиділяючого елемента, шляхом визначення місцезнаходження, типу і розміру дефектів пошкодження і руйнування поверхні оболонки.

Отримано удосконалені аналітичні вирази моделей пошкодженості та деформації оболонки тепловиділяючого елемента, на основі врахування фрактальних прирощень геометричних параметрів оболонки (площі, висоти, товщини тощо), які дозволяють, точніше, визначати фактичний критерій оцінки ступеня герметичності (розгерметизації) елементу.

Показано, що пошкодженість та деформація на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки залежить від зміни фрактальної розмірності та глибини скін-шару у товщині оболонки тепловиділяючого елемента.

Розроблено фрактальну модель пошкодження оболонки тепловиділяючого елемента, яка дозволяє визначити утворення та зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки, на основі розрахунку часу та швидкості формування загального кластера з молекул газу гелію у наскрізній тріщині, на основі застосування обчислювального апарату фрактально-кластерної теорії.

Розроблено та запропоновано новий фрактальний метод оцінки ступеня розгерметизації тепловиділяючого елемента, заснований на вимірі величини фрактальної розмірності у структурі матеріалу оболонки, яка визначається в

залежності від величини електричного опору (потужності) від прикладеної частоти при протіканні скін-ефекту на поверхні оболонки елемента.

У *третьому розділі* експериментально підтверджено неруйнівний метод оцінювання якості герметичності оболонки елемента, який дозволяє визначити місце розташування та розміри дефекту на поверхні оболонки, без вилучення елемента з тепловиділяючої збірки, на основі визначення величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах за висотою елемента, шляхом вимірювання електричного опору та потужності залежно від прикладеної частоти при використанні скін-ефекту. Запропоновано алгоритм застосування методу контролю, який пропонується покласти в основу інформаційно-вимірювального модуля виявлення дефектів системи контролю герметичності оболонки.

Експериментально обґрунтовано вибір величини фрактальної розмірності, для практичного використання, в якості ефективного критерію оцінки ступеня розгерметизації оболонки. Наведено алгоритм вимірювань величини фрактальної розмірності, яка відповідає різним типам дефектів ушкодження за місцезнаходженням та розмірами, на поверхні оболонки по всій висоті елемента. Підтверджено адекватність одержаних теоретичних досліджень щодо вдосконалення моделей ушкодженості та деформації оболонки, на основі проведення експерименту на фізичній моделі оболонки тепловиділяючого елемента у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту.

Четвертий розділ присвячений практичному впровадженню неруйнівного методу системи контролю герметичності оболонки для виявлення розгерметизованих елементів у складі тепловиділяючих збірок реактора.

Проведено удосконалення структурно-функціональної схеми системи контролю герметичності оболонки елемента реактора, шляхом впровадження інформаційно-вимірювального обчислювального модуля виявлення дефектів, який забезпечує обробку даних та їх передачу в автоматизовану систему управління технологічними процесами енергоблоку на основі розроблених етапів алгоритму використання методу контроля, у яких визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної

розмірності, для встановлення місця, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти елемента, що дозволяє проведення більш точного та інформативного контролю стану герметичності оболонки елементу реактора.

Викладено практичне застосування удосконаленої штатної методики виявлення дефектів на поверхні оболонки негерметичного тепловиділяючого елемента, заснованої на алгоритмі обчислення утворення та формування контурів дефектів у структурі матеріалу оболонки та визначенні місцезнаходження, типу та розміру дефекту ушкодження на аксіальному сегменті по всій висоті елемента. Запропоновано методику вимірювання геометричних параметрів елемента, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля виявлення дефектів, на основі удосконалення структурно-функціональної схеми обчислення геометрії елемента.

Розглянуто методики виміру ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки та виміру овальності оболонки тепловиділяючого елемента. Проведено визначення помилки результату: вимірювання окремим датчиком вимірювання системи контролю герметичності оболонки; виміру діаметру оболонки; вимірювання ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки; вимірювання овальності оболонки.

Запропоновано алгоритм проведення метрологічної атестації методики вимірювань геометричних параметрів елемента, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля системи контролю герметичності оболонки. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблене методичне, математичне, метрологічно-інструментальне та апаратно-програмне забезпечення, можуть знайти практичну апробацію у випробувальних стендах та науково-дослідних лабораторіях на атомних електростанціях України, а також у навчальному процесі кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії при проведенні занять.

Ключові слова*: якість, кваліметрія, прогностичні моделі, марковські методи, імітаційне моделювання, інформаціфно-вимірювальна система, тепловиділяючий елемент*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

І. Публікації в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових виданнях Scopus

1. *Khomiak E.*, Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. Vol. 4, № 8(118). P. 60–70.

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Європейського Союзу

2. *Хом'як Е. А.,* Буданов П. Ф., Кирисов І. Г. Фрактально-кластерний метод контролю оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention*: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. P. 136–150.

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

3. *Хом'як Е. А*., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Кирисов І. Г. Сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента. *Вісник ВПІ.* 2022. Вип. 3. С. 11–16.

4. *Хом'як Е. А*., Буданов П. Ф. Удосконалення системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. Збірник наукових праць «Машинобудування». УИПА. 2022. № 29. С. 32–49.

5. *Хом'як Е. А*., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Кирисов І. Г. Підвищення надійності АСУ ТП у позаштатних режимах роботи енергоблока електростанції. *Вісник ВПІ*. 2022. Вип. 2. С. 28–32.

ІІ. Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Матеріали й тези конференції

6. *Хом'як Е. А*., Бровко К. Ю., Буданов П. Ф. Розробка фізичної моделі розгерметизації оболонки ТВЕЛ. *ІІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)»*: зб. наук. пр. Харків: «Друкарня Мадрид», 2019. С. 48–49.

7. *Хом`як Е. А*., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Проблеми забезпечення безпеки ядерних реакторів при розгерметизації оболонки ТВЕЛ. *Priority directions of science development:* abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. Lviv, Ukraine, 2019. P. 160–164.

8. *Хом`як Е. А*., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Методи контролю герметичності ТВЕЛ для підвищення ядерної безпеки АЕС. Молодь і технічний прогрес в АПК : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: ХНТУСГ, 2019. Том 2. С. 230.

9. *Хом'як Е. А.,* Бровко К. Ю., Буданов П. Ф. Удосконалення ПТК АСУТП для забезпечення надійності та безпеки функціонування енергоблоку у нештатних режимах. *III Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2019)»*: зб. наук. пр. Харків: «Друкарня Мадрид», 2019. С. 50–51.

10. *Хомяк Е. А.,* Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Розроблення моделі прийняття рішення оперативним персоналом у позаштатних режимах функціонування електростанції. *10th International Scientific Conference «Science progress in European countries: new concepts and modern solutions»*: Papers of the 10th International Scientific Conference. October 25, Stuttgart, Germany, 2019. P. 55–64.

11. *Хом'як Е. А*., Бровко К. Ю., Буданов П. Ф. Підвищення надійності та безпеки ядерних реакторів на основі методу контролю достовірності інформації. *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2020)»*: зб. наук. пр. Харків: «Друкарня Мадрид», 2020. С. 47–49.

12. *Хом'як Е. А*., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Кирисов І. Г. Підвищення ефективності автоматизованого управління енергоблоком в нештатних режимах функціонування. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2021)»*: зб. наук. пр. Харків: «Друкарня Мадрид», 2021. С. 39–40.

13. *Khomiak E*. Modern methods of controlling tightness of shells of the fuel element. *Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення*: збірник матеріалів

конференції. Харків: Українська інженерно-педагогічна академія, 2022. С. 36.

14. *Хом`як Е. А.*, Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Тимошенко О.А. Розробка методики контролю розгерметизації оболонок твел енергоблоку АЕС. *Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення:* зб. матеріалів конференції. Харків: Українська інженерно-педагогічна академія, 2022. С. 14.

15. *Хом`як Е. А.*, Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Тимошенко О. А. Методика контролю динаміки порушення герметичності тепловиділяючих елементів тепловиділяючих збірок ядерного реактора. *Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення:* зб. матеріалів конференції. Харків: Українська інженерно-педагогічна академія, 2022. С. 17.

ІІІ. Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

Статті у наукових виданнях, апробаційного характеру

16. *Хом`як Е. А.,*Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Аналіз факторів безпеки при експлуатації тепловиділяючих елементів ядерного реактора атомної електростанції. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки.* «*Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. Харків: ХНТУСГ, 2019. Вип. 204. С. 50–52.

17. *Хом'як* Е. А., Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Тимошенко О. А. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елементу для підвищення безпеки ядерного реактора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. Нац. тех. ун-т «Харків. політехн. ін.-т»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. №1(1). С. 26–31.

18. *Хом'як Е. А.*, Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Федоров Є. В. Удосконалення АСУ ТП енергоблоку електростанції для різних режимів функціонування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. Нац. тех. ун-т «Харків. політехн. ін.-т»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. №1(1). С. 32–38.

19. *Хом'як Е. А.*, Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Жуков С. Ф. Розробка методу контролю оболонки ТВЕЛ для підвищення безпеки ядерного реактора. *Вчені записки*

ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71) Ч. 2. № 2. С. 49–54.

20. *Хом'як Е. А*., Кирисов І. Г., Буданов П. Ф., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента. *Вісник ВПІ*. 2022. Вип. 1. С. 35–38.

Патент

21. *Хом`як Е. А.,* Буданов П. Ф., Чернюк А. М., Олійник Ю. С. Спосіб виявлення помилкових спрацьовувань у нештатних режимах функціонування енергооб'єкта : пат. 135872 Україна : МПК G06F 1/00. № u2019 01090 ; заявл. 04.02.2019 ; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14.

ABSTRACT

Khomiak E.A. A method for assessing the quality of parameters of a fuel element of a nuclear power plant unit .

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 - Metrology and Information and Measuring Technology - Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, 2023.

The object of the research - is the process of assessing the quality of control of fuel element shell parameters.

The subject of the research - is the method of controlling the parameters of the fuel element.

The purpose of the study is to assess the quality of control of the fuel element parameters by developing a method of automated non-destructive testing using the theory of fractal-cluster geometry.

The study was performed using the provisions of fractal-cluster theory, mathematical modeling, numerical methods of analysis, modern information technology and methods of mathematical statistics for processing experimental data.

Scientific novelty of the obtained results.

– For the first time, a mathematical model for calculating the shape change of the geometry of the fuel element was developed, which, unlike the known ones, allows to take into account structural and phase changes and fractal properties in the volume of the cladding material when exposed to damage to its outer and inner surface, based on the application of the theory of fractal geometry;

– For the first time, a fractal model of the damaged fuel element cladding was developed, which, unlike the known ones, allows to determine the appearance and dynamics of the through crack growth in the structure of the fuel element cladding material, based on the calculation of the time and speed of formation of a common cluster of helium gas molecules in the through crack using the fractal cluster geometry computing apparatus;

– For the first time, an experimental method of non-destructive automated control of the tightness of the shell of the fuel element was developed, which, unlike the known ones, allows you to determine the location, type and dimensions of the defect on the outer and inner

surface of the shell, without removing the fuel element from the fuel assembly, based on further development of analytical expressions of the improved model of damage and deformation of the shell of the fuel element and determination of the criterion for assessing the degree of depressurization in the form of a quantitative value of fractal dimension on axial segments along the height of the fuel element; by determining the depth of the skin layer in the thickness of the shell, based on measurements of electrical resistance and power, depending on the applied frequency when using the skin effect.

Reliability of fuel elements is determined by their ability to retain nuclear fuel fission products inside the shell without exceeding the level of geometric shape change, which leads to severe accidents and catastrophes at nuclear facilities. The development of an actual criterion for assessing the degree of depressurization of the element shell is an urgent scientific and practical task, which is solved by introducing methodological, mathematical, metrological, instrumental and hardware and software, which in general is an information and measuring system for monitoring the tightness of the fuel element shell.

In *the introduction*, the general characteristics of the dissertation research, their relevance, compliance with scientific topics are given; the scientific novelty and practical significance of the results of the dissertation, as well as the subject and object of research are determined, the purpose and objectives of the research are formulated, the connection of the work with scientific programs, plans, topics is shown, data on the approbation of the results and publications are given.

The first section of the work is devoted to the analysis of standard systems of element shell leakage control used in all water-water power reactors, as well as the basic models and methods for standard systems of fuel element shell leakage control are analyzed.

It is shown that the control methods do not allow to determine the location, type and size of damage and destruction defects on the shell surface, and are limited by the lack of automation and informatization.

The basic conditions, which should be met by the information and measuring system for controlling the tightness of the fuel element shell, are established. The most used methods and software equipment for mathematical modeling of behavior and dynamics of damage and destruction of the fuel element shell are analyzed, their advantages and disadvantages are

determined.

The second section is devoted to the development of a method for controlling the tightness of the fuel element shell, which is based on taking into account changes in the structural-phase state and fractal properties of the shell material.

A physical (geometric) model of the fuel element shell in the form of a geometric figure of an empty cylinder is developed and proposed, which allows to determine the real change of such geometric parameters as: outer and inner diameter, thickness and area of the outer and inner surface of the shell along the entire topological height of the fuel element, taking into account the fractal properties of the structure of the material of the shell with damaged outer and inner surface, based on the use of the calculating device of the theory of fractals.

It is shown that in the experimental physical (geometric) model of the fuel element shell, the structure of the material, in which local inhomogeneities, micropores and macrocracks are formed as a result of the damaging defects, has specific fractal properties: invariance, scalability and self-similarity, which explains the choice of an effective parameter for assessing the structural-phase change and taking into account the fractal properties in the volume of the shell material - the value of the fractal dimension, which determines the degree of filling of the pore space of the fuel element shell material.

It is determined that in the model of the fuel element, in the form of a geometric figure of a hollow cylinder, the change in the value of the real outer and inner area of the damaged surface and the height of the shell is in degree dependence on the change in the value of the fractal dimension of the structure of the shell material.

It was found that for the calculations of the assessment of the criteria for the state of the shell material surface, as a rule, restrictions and assumptions are introduced regarding geometric increments, which lead to approximate and inaccurate characteristics in the used standard systems for monitoring the tightness of the fuel element shell, as the structural-phase state of the shell material structure is not taken into account, therefore, to a decrease in the level of reliability and safety during their operation.

It is substantiated that as a basis for calculations, evaluation of the criteria for the state of the shell material surface, it is necessary to use the fractal properties of the shell material

structure and quantitative fractal value - fractal dimension, which allows to determine the degree of depressurization of the fuel element by determining the location, type and size of defects of damage and destruction of the shell surface.

The improved analytical expressions of the models of damage and deformation of the fuel element shell, based on the fractal increments of the geometric parameters of the shell (area, height, thickness, etc.), which allow, more correctly, to determine the actual criterion for the degree of tightness (depressurization) of the element, are obtained.

It is shown that damage and deformation on the outer and inner surfaces of the shell depends on the change of fractal dimension and skin layer depth in the thickness of the fuel element shell.

A fractal model of damage to the fuel element shell has been developed, which allows to determine the formation and growth of a through crack in the structure of the shell material, based on the calculation of the time and speed of formation of a common cluster of helium gas molecules in the through crack, based on the use of the fractal-cluster theory calculation device.

A new fractal method for evaluation of the degree of depressurization of the fuel element, based on the measurement of the fractal dimension in the structure of the shell material, which is determined depending on the value of electrical resistance (power) from the applied frequency during the skin effect on the outer and inner surfaces of the fuel element shell, is developed and proposed.

In the third section, In the third section, a non-destructive method of controlling the tightness of the element shell is experimentally confirmed, which allows determining the location and size of the defect on the surface of the shell, without removing the element from the fuel assembly, based on determining the value of the fractal dimension on the axial segments along the height of the element, by measuring the electrical resistance and power depending on the applied frequency when using the skin effect. An algorithm for applying the control method is proposed, which is proposed to be the basis of the information and measuring module for detecting defects in the shell tightness control system.

The choice of the value of fractal dimension for practical use as an effective criterion for assessing the degree of depressurization of the shell is experimentally substantiated. An

algorithm for measuring the value of the fractal dimension, which corresponds to different types of damage defects by location and size, on the surface of the shell along the entire height of the element is given. The adequacy of the obtained theoretical studies on the improvement of the models of damage and deformation of the shell is confirmed on the basis of the experiment on the physical model of the shell of the fuel element in the form of a cylindrical tube using the skin effect.

The fourth section is devoted to the practical implementation of the non-destructive method of the shell leakage control system for detecting leaking elements in the reactor fuel assemblies.

The structural and functional scheme of the reactor element shell leakage control system was improved by introducing an information-measuring computing module for defect detection, which provides data processing and their transfer to the automated process control system of the power unit based on the developed stages of the algorithm for using the control method which define the sequence of measuring and computing operations to calculate the fractal dimension indicators to determine the location, type and size of the defect on the axial segments of the element height, which allows for more accurate and informative monitoring of the reactor vessel shell leakage state.

The practical application of the improved standard method of detecting defects on the surface of the shell of a non-hermetic fuel element, based on the algorithm for calculating the formation and formation of defect contours in the structure of the shell material and determining the location, type and size of the damage defect on the axial segment along the entire height of the fuel element is presented.

The methods of measuring the effective diameter in a given cross-section of the shell and measuring the ovality of the fuel element shell are considered. The determination of the error of the result of: measurement by a separate measurement sensor of the shell tightness control system; measurement of the diameter of the shell; measurement of the effective diameter in a given cross section of the shell; measurement of the ovality of the fuel element shell.

An algorithm for metrological certification of the method of measuring the geometric parameters of the element, using measuring sensors of the computing module of the shell

tightness control system, is proposed. The results of theoretical and experimental studies, as well as the developed methodological, mathematical, metrological, instrumental and hardware-software software, can find practical testing in test benches and research laboratories at nuclear power plants in Ukraine, as well as in the educational process of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies of the Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy during classes.

Keywords: *quality, qualimetry, prognostic models, markov techniques, simulation modeling, information and measurement system, fuel element*

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION

I. Publications in which the main scientific results of the dissertation are published

Articles in scientific publications of Scopus

1. *Khomiak E.*, Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. Vol. 4, № 8(118). P. 60–70.

Articles in periodical scientific publications of other countries, that are members of the European Union

2. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Kirisov I. G. Fractal – cluster method for testing the shell of a nuclear reactor fuel element. *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention: Scientific monograph*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing». 2022. P. 136–150.

Articles in scientific publications included in the list of scientific professional publications of Ukraine

3. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Kirisov I. G. Modern approaches and requirements to the methods of tightness control of fuel element shell. Bulletin of VPI. 2022. Vol. 3, P. 11–16.

4. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F. Improvement of the nuclear reactor fuel element shell tightness control system. *Collection of scientific works "Mechanical engineering". UIPA.* 2022. no. 29. P. 32–49.

5. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Kirisov I. G. Improving the reliability of the automated process control system in abnormal operating modes of the power plant unit. *VPI Bulletin.* 2022. no. 2. P. 28–32.

II. Publications that certify the approbation of the dissertation materials

Materials and abstracts of the conference

6. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Development of a physical model of fuel element shell depressurization. *III International Scientific and Technical Conference "Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2019)":*

Proceedings of the International Scientific and Technical Conference: "Printing House Madrid. 2019. C. 48–49.

7. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Problems of ensuring safety of nuclear reactors in case of fuel element shell depressurization. *Priority directions of science development:* abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. Lviv, Ukraine. 2019. P. 160–164.

8. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Methods of fuel element tightness control to improve nuclear safety of NPPs. *Youth and technical progress in agriculture* : materials of the International scientific and practical conference. Kharkiv: KHNTUA. 2019. Vol. 2, P. 230.

9. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Improvement of the automated process control system to ensure reliability and safety of power unit operation in abnormal modes. *III International Scientific and Technical Conference "Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2019)":* Proceedings of the International Scientific and Technical Conference: "Printing House Madrid". 2019. P. 50–51.

10. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Development of a decision-making model for operating personnel in abnormal modes of operation of a power plant. *10th International Scientific Conference «Science progress in European countries: new concepts and modern solutions»*: Papers of the 10th International Scientific Conference. October 25, Stuttgart, Germany. 2019. P. 55–64.

11. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Improvement of reliability and safety of nuclear reactors based on the method of information reliability control. *IV International Scientific and Technical Conference "Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2020)":* Proceedings of the International Scientific and Technical Conference: "Printing House Madrid". 2020. P. 47–49.

12. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Kirisov I. G. Improving the efficiency of automated control of the power unit in abnormal operating modes. *V International Scientific and Technical Conference "Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2021)":* Proc. of the International Scientific Conference: "Printing House Madrid". 2021. P. 39–40.

13. *Khomiak E*. Modern methods of controlling tightness of shells of the fuel element. *Quality, standardization and metrological support:* collection of conference materials. Kharkiv: Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy. 2022. P. 36.

14. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Tymoshenko O. A. Development of the methodology for control of *fuel element* shells depressurization of NPP power unit. *Quality, standardization and metrological support*: collection of conference materials. Kharkiv: Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy. 2022. P. 14.

15. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Tymoshenko O. A. Methodology for control of tightness dynamics of fuel elements of nuclear reactor heat-emitting assemblies. *Quality, standardization and metrological support:* conference proceedings. Kharkiv: Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy. 2022. P. 17.

III. Publications that additionally reflect the scientific results of the dissertation

Articles in scientific publications, approbation character

16. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu. Analysis of safety factors in the operation of nuclear reactor fuel elements of nuclear power plant. *Bulletin of the Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine". Kharkiv: KHNTUA.* 2019. Vol. 204, P. 50–52.

17. *Khomiak E. A.,* Brovko K. Yu., Budanov P. F., Tymoshenko O. A. Improvement of the fuel element shell control method to increase nuclear reactor safety. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: reliability and energy efficiency : collection of scientific publications of the National Technical University* "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv: NTU "KHPI". 2020. no. 1(1). P. 26–31.

18. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Fedorov E. V. Improvement of the automated process control system of the power unit of the power plant for different modes of operation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: reliability and energy efficiency : collection of scientific publications of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".* Kharkiv: NTU "KHPI". 2020. no. 1(1). P. 32–38.

19. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Brovko K. Yu., Zhukov S. F. Development of fuel element shell control method to improve nuclear reactor safety. *Scientific notes of TNU named by V.I. Vernadsky. Series: Technical sciences.* 2021. Vol. 32 (71), Part 2. no. 2. P. 49–54.

20. *Khomiak E. A.,* Kirisov I. G., Budanov P. F., Brovko K. Yu. Approaches and requirements to modeling the structure of semiconductor layer of solar cell. *Bulletin of VPI.* 2022. Vol. 1, P. 35–38.

Patent

21. *Khomiak E. A.,* Budanov P. F., Cherniuk A. M., Oliynyk Y. S. A method for detecting false alarms in abnormal modes of operation of a power object : pat. 135872 Ukraine : IPC G06F 1/00. no. u 2019 01090; declared on 04.02.2019; published on 25.07.2019, Bulletin no. 14.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ…….. 6
ВСТУП……..…….. 7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНОК ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА……. 17
1.1 Аналіз вимог та критеріїв, щодо забезпечення межі пошкодження оболонки ТВЕЛ……..…… 17
1.2 Аналіз факторів та причин виникнення ушкоджуючих дефектів на зовнішній та внутрішній поверхні та їх вплив на структурно-фазові зміни в об’ємі матеріалу оболонки ТВЕЛ…… 23
1.2.1 Загальні властивості оболонок ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000..…… 23
1.2.2 Загальні відомості про конструкцію та основні геометричні параметри ТВЕЛ…….……. 25
1.2.3 Аналіз фізичних явищ, факторів та причин ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ..... 30
1.2.3.1 Аналіз фізичних явищ та процесів, що впливають на пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ…… 30
1.2.3.2 Аналіз видів і причин утворення ушкоджуючих дефектів на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ…… 31
1.2.3.3 Дослідження механізму розгерметизації ТВЕЛ… 34
1.2.3.4 Аналіз впливу зовнішніх факторів на поверхню оболонки ТВЕЛ…… 37
1.3 Дослідження процесу утворення ушкоджуючих дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ з позицій кластерного підходу……. 38

1.4 Методологічні підходи щодо виявлення та дослідження дефектів у негерметичних ТВЕЛ…….. 41
1.5 Аналіз існуючих моделей ушкодженості та методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000……. 44
1.5.1 Аналіз існуючих моделей для контролю пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ…… 44
1.5.2 Аналіз існуючих неруйнівних методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000…….. 47
1.6 Аналіз сучасних систем контролю герметичності оболонки ТВЕЛ…… 58
1.6.1 Аналіз вимог до сучасних систем контролю герметичності оболонки ТВЕЛ…… 58
1.6.2 Аналіз видів контролю у сучасних системах контролю герметичності оболонки ТВЕЛ……. 62
1.7 Узагальнення результатів аналізу. Обґрунтування напрямків досліджень…… 69
Висновки до першого розділу…… 71
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЛЯ СИСТЕМИ КГО ТВЕЛ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЇ ГЕОМЕТРІЇ…….. 73
2.1 Обґрунтування фрактального підходу для дослідження фізичних процесів, що викликають пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ..... 73
2.1.1 Загальна схема фрактального підходу……... 73
2.1.2 Обґрунтування вибору об’єктів та методу проведення досліджень структури матеріалу ушкодженої оболонки ТВЕЛ……. 77
2.2 Розробка фізичної моделі оболонки ТВЕЛ……... 78

2.2.1 Розробка фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнього циліндра..... 78
2.2.2 Застосування скін-ефекту для дослідження фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра…… 80
2.2.3 Дослідження геометричних параметрів фізичної моделі ТВЕЛ з використанням апарату фрактальної геометрії….. 81
2.3 Дослідження моделі ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації…… 85
2.3.1 Дослідження моделі ушкодженості оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації……. 85
2.3.2 Дослідження моделі деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації……. 90
2.4 Дослідження фрактальної структури матеріалу оболонки порожнистого циліндра на основі скін-ефекту……. 95
2.5 Розробка критерію оцінки часу формування та зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ…… 101
Висновки до другого розділу……... 113
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ……... 115
3.1 Порядок проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту…… 115
3.2 Дослідження та обговорення результатів експериментальних досліджень зразка трубки – імітатора фізичної моделі ТВЕЛ з різними ушкоджуючими дефектами на поверхні оболонки……... 121
Висновки до третього розділу…… 127

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ…….…….. 128

4.1 Розробка варіанта структурної схеми вдосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента для застосування фрактального методу…….. 128

4.2 Розробка алгоритму для обчислювального модуля системи контролю за герметичністю оболонки для поєднання з автоматизованою системою управління технологічними процесами енергоблоку АЕС…… 129

4.3 Практичні рекомендації щодо впровадження обчислювального програмного модуля системи КГО для ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС…… 135

4.4 Метрологічна атестація методики вимірювання геометричних параметрів ТВЕЛ із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля системи КГО……. 138

4.5 Визначення похибки результатів вимірювань геометричних параметрів……. 140

Висновки до четвертого розділу……..... 143

ВИСНОВКИ…… 145

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..... 150

ДОДАТКИ……... 179

Додаток А. Документи, які підтверджують впровадження основних результатів дисертаційної роботи……. 179

Додаток Б. Список опублікованих праць за темою дисертації…….. 183

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЕС – Атомна електрична станція

АРМ – Автоматизоване робоче місце

АС – Аксіальний сегмент

АСРК – Автоматизована система радіаційного контролю

АСУ ТП – Автоматизована система управління технологічними процесами;

БД – Блок детектування

ВВЕР – Водоводяний енергетичний реактор

ГСКГО – Газова система контролю герметичності оболонок твелів

ГП – Геометричні параметри

КГО – Контроль герметичності оболонки

ККА – Кластер-кластерна агрегація

МАГАТЕ – Міжнародне агентство з атомної енергії

РУ – Реакторна установка

СКГО – Система контролю герметичності оболонки

СОДС-Р – Система виявлення дефектних ТВС в активній зоні зупиненому реакторі

ССКГО – Секторна система КГО по нейтронах, що запізнюються в теплоносії першого контуру

ТВЕЛ – Тепловиділяючий елемент

ТВЗ – Тепловиділяюча збірка

ТЯП – Таблетка ядерного палива

УТЦ – Навчально-тренувальний центр

ФР – Фрактальна розмірність

ФС – Фрактальна структура

ЯР – Ядерний реактор

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За прогнозами Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія (НАЕК) “Енергоатом” – найбільшого виробника електроенергії в Україні, у найближчі 40 років, генерація електроенергії на АЕС становитиме близько 50% загальної генерації, основою ядерної енергетики залишаються реакторні установки з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР-1000) [1].

Одна з реальних проблем для створення безпечних умов роботи енергетичних ядерних реакторів (ЯР) – забезпечення надійної роботи тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ) тепловидільних зборок (ТВЗ) для стаціонарних та перехідних режимів експлуатації та в аварійних умовах [2].

Основним параметром, що обмежує зростання ефективності експлуатації ЯР типу ВВЕР-1000, є герметичність оболонок ТВЕЛ. При досягнутому рівні розуміння процесу розгерметизації оболонок ТВЕЛ, в нормальних умовах експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР-1000, механізм розгерметизації оболонки, приблизно в 20% випадків невідомий [3, 4].

Надійність ТВЕЛ, визначається їх здатністю утримувати продукти поділу ядерного палива всередині оболонки, не перевищуючи рівень геометричної формозміни (подовження, звуження, розтягування, опуклість та ін.), що призводить до погіршення їхньої охолоджуваності [5].

До найбільш важливих параметрів, що впливають на ресурсні характеристики та безпеку роботи ТВЕЛ, відноситься ступінь пошкодження оболонки, як основного бар’єру, що перешкоджає виходу радіоактивних продуктів поділу в теплоносій та навколишнє середовище [6].

Як показує практика [7], проведення модернізації конструкцій ТВЕЛ, переведення активних зон (АЗ) ядерного реактора типу ВВЕР-1000, на підвищене вигоряння таблеток ядерного палива (ТЯП), призводять до зміни типового стану опромінених ТВЕЛ.

Отже, потрібен розвиток бази даних за ушкоджуючими дефектами оболонок

ТВЕЛ, а також удосконалення існуючих та розробка нових систем контролю герметичності оболонки (КГО) та методів контролю для їх виявлення та ідентифікації [8].

Характеристики ушкоджуючих дефектів оболонки (місце розташування, тип, розміри), дозволяють з'ясувати ймовірну причину їх появи: порушення технології виготовлення ТВЕЛ; недоліки конструкції ТВЗ; відхилення від штатних режимів експлуатації тощо [9 – 10].

Аналіз даних МАГАТЕ [11 – 20], з причин розгерметизації ТВЕЛ реакторів типу PWR у США, отримані при їх експлуатації за 20 років (1998 - 2018 р), показав головні фактори розгерметизації оболонок ТВЕЛ: схлопування оболонки; первинне гідрування оболонки; корозія (зокрема рівномірна, локальна, під відкладеннями); фреттінг-корозія оболонок; ушкодження оболонок; взаємодія ядерного палива з оболонкою; сміття у теплоносії; невідомі причини.

Аналіз показав [11 – 20], що 20% причин факторів розгерметизації оболонок ТВЕЛ невідомі. Причиною цього, на діючих ядерних реакторах типу ВВЕР-1000, є те, що немає технічних засобів і не передбачено процедур для визначення місця зруйнованого ТВЕЛ у складі ТВЗ, локалізації аксіального сегмента (АС) оболонки ТВЕЛ, в якому відбулася розгерметизація. Крім цього, на українських АЕС, не ведеться запис статистики щодо локалізації областей розгерметизації ТВЕЛ.

Отже, виявлення та ідентифікація пошкоджень оболонки ТВЕЛ, за час експлуатації – одне з пріоритетних завдань післяреакторних досліджень ТВЕЛ у захисних камерах дослідних центрів АЕС [21].

На сьогоднішній день, в системах КГО, застосовують такі руйнівні та неруйнівні методи контролю: капілярні, радіографічні, радіохвильові, мас-спектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні, вихрострумові дефектоскопії і т.д. [22 – 27].

Аналіз відомих методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, виявив характерні недоліки [28 – 36]:

– прийнято обмеження та припущення, щодо усереднення геометричних характеристик для всіх ТВЕЛ у складі ТВЗ;

– врахування тільки послідовного накопичення ушкодженості в умовах експлуатації ТВЕЛ;

– в якості основного фізичного процесу накопичення ушкодженості, при частоті навантаження (<<1 Гц), розглядається повзучість оболонки ТВЕЛ, без урахування структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР-1000;

– розрахунок ушкодженості оболонки, розраховується за граничними умовами, тільки для найбільш напруженого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті оболонки ТВЕЛ, що вносить значні усереднення та похибки в розрахунки;

– здійснюється лише вибірковий контроль ТВЕЛ відпрацьованої ТВЗ, а частина виявлених аномалій, не вдається ідентифікувати, що значною мірою знижує достовірність отриманих результатів і загалом позначається на якості досліджень ТВЕЛ;

– при розгляді фізичних процесів та явищ, що викликають ушкоджуючі фактори, а, отже, дефекти на зовнішній та внутрішній поверхнях оболонки, не враховуються структурно-фазові стани (перетворення) у всьому об’ємі структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Аналіз відомих моделей [37 – 44], що застосовуються у методах системи КГО ТВЕЛ показав, що в них зазвичай використовують:

– урахування взаємопов’язаного прояву процесів різної природи, а саме: нейтронно-фізичних, теплофізичних, фізико-хімічних, термомеханічних та теплогідравлічних процесів, для зниження консервативності розрахунків при обґрунтуванні безпеки ЯР АЕС;

– уточнення експериментальних результатів з термомеханічних ефектів, отриманих, ще наприкінці 70-х і в 80-х роках, і тих, що не зазнали помітних кількісних та якісних змін;

– обґрунтування безпеки ЯР АЕС, через вивчення деформаційної поведінки оболонки ТВЕЛ у “міжТВЕЛьному” просторі.

Однак, аналіз відомих моделей [37 – 44], для опису фізичних процесів, що протікають у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, при її ушкодженості, показав

загальні характерні недоліки, а саме:

– у розрахункових моделях ушкодженості та руйнування оболонки, вводяться обмеження та припущення на зміну геометричних параметрів ТВЕЛ та не враховуються структурно-фазові зміни в об’ємі матеріалу оболонки;

– у моделях, використовуються емпіричні кореляції та ненадійні екстраполяції, для оцінки невизначеності результатів розрахунку;

– моделі прив’язані до певних вибраних матеріалів оболонки;

– на сьогоднішній день, мало у повній мірі розроблено моделей, що описують утворення локальних неоднорідностей, пір, тріщин у структурі матеріалу, які впливають на ушкодженість оболонки ТВЕЛ;

– при моделюванні процесів взаємодії ТЯП із внутрішньою поверхнею оболонки, необхідно враховувати всю протяжність такого контакту по всій геометричній висоті паливного стовпа ТВЕЛ.

Звідки випливає, що 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].

При цьому, в моделях ушкодженості оболонки ТВЕЛ, при моделюванні фізичних процесів, які протікають у структурі матеріалу ТВЕЛ, необхідно враховувати, як геометричні параметри ТВЕЛ, так і їх збільшення, з урахуванням ушкоджуючих дефектів [50 – 59].

Відомо [60 – 76], що такі поверхні з ушкоджуючими дефектами, мають неоднорідну і пористу структуру, яка має фрактальні властивості самоподібності і масштабованості і може характеризуватись кількісною величиною – фрактальною розмірністю.

Тому, у роботі, для розробки методу оцінки критерію стану структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, з ушкодженою зовнішньою та внутрішньою поверхнями, запропоновано використовувати обчислювальний апарат фрактальної геометрії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи, відповідає основним цілям програми розвитку атомної енергетики в межах реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Робота проводилась на кафедрі «Фізики, електротехніки та електроенергетики» УІПА, у рамках науково-дослідних тем Міністерства освіти і науки України: «Проект підсистеми контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС» (державний реєстраційний номер: 0122U200550, термін виконання 2021-2022 р.р.), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи є оцінка якості контролю параметрів тепловиділяючого елемента шляхом розробки методу автоматизованого неруйнівного контролю із застосуванням теорії фрактально – кластерної геометрії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

– провести аналіз моделей та методів розрахунку зміни властивостей тепловиділяючого елемента та умов руйнування його оболонки;

– розробити фізичну модель оболонки тепловиділяючого елемента та провести дослідження структурно-фазового стану фрактальної структури матеріалу оболонки для визначення методики розрахунку фрактальних прирощень геометричних параметрів ТВЕЛ з використанням апарату фрактальної геометрії;

– дослідити та удосконалити аналітичні вирази для моделі ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ, на основі врахування основного процесу накопичення ушкодженості та визначальних її фрактальних прирощень геометричних параметрів ТВЕЛ;

– дослідити процес утворення кластер-кластерних агрегацій з молекул газу гелію в пористому об'ємі матеріалу для визначення часу зростання наскрізної тріщини у фрактальної структурі товщини оболонки ТВЕЛ;

– провести обробку експериментальних даних, щодо дослідження фрактальної структури матеріалу ушкодженої оболонки, для визначення критерію оцінки ступеня розгерметизації ТВЕЛ;

– розробити алгоритм обчислювального модуля системи КГО, для управління властивостями ТВЕЛ та його поєднання з АСУ ТП енергоблоку АЕС, який враховує вимоги щодо ядерної безпеки при експлуатації ЯР.

Об’єкт дослідження – процес оцінювання якості контролю параметрів оболонки тепловиділяючих елементів.

Предмет дослідження – метод контролю параметрів тепловиділяючого елемента.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань, використовувалися сучасні аналітичні методи математичного моделювання, математичний апарат фрактально-кластерної геометрії, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

– вперше, розроблено математичну модель розрахунку формозміни геометрії тепловиділяючого елемента, яка на відміну від відомих, дозволяє при розрахунку реальних геометричних параметрів по всій висоті тепловиділяючого елемента, враховувати структурно – фазові зміни та фрактальні властивості в об'ємі матеріалу оболонки, при впливі ушкоджень на її зовнішню та внутрішню поверхню, на основі застосування теорії фрактальної геометрії;

– вперше, розроблено фрактальну модель ушкодженої оболонки тепловиділяючого елемента, яка на відміну від відомих, дозволяє визначити появу та динаміку зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента, на основі розрахунку часу та швидкості формування загального кластера з молекул газу гелію в наскрізній тріщині із застосуванням обчислювального апарату фрактально - кластерної геометрії;

– вперше, розроблений експериментальний метод неруйнівного автоматизованого контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, який на відміну від відомих, дозволяє визначити місце розташування, тип та розміри дефекту на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки, без вилучення тепловиділяючого елемента з тепловиділяючої збірки, на основі подальшого розвитку аналітичних виразів удосконаленої моделі ушкодження та деформування оболонки

тепловиділяючого елемента та визначення критерію оцінки ступеня розгерметизації у вигляді кількісної величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах по висоті тепловиділяючого елемента, шляхом визначення глибини скін – шару у товщині оболонки, на основі вимірювань електричного опору та потужності, в залежності від прикладеної частоти при використанні скін – ефекту.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що експериментально розроблений метод оцінювання якості, може бути застосований у штатних системах КГО ядерного реактора АЕС, при проведенні реакторного та післяреакторного КГО ТВЕЛ, для виявлення місцезнаходження, типу та розміру пошкоджуючого дефекту в структурі оболонки ТВЕЛ, без вилучення ТВЕЛ з ТВЗ, що дозволяє проводити контроль герметичності ТВЕЛ, на ранній стадії у порівнянні зі штатною методикою, що застосовується в системах КГО, а також скоротити час на вантажно-розвантажувальні роботи для ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ, приблизно в 3÷5 разів, що дає економічний ефект і скорочує кількість неоперативного персоналу АЕС, що залучається. Крім того, практичну цінність представляє інформаційно-вимірювальний блок виявлення та вимірювання дефектів оболонки ТВЕЛ, який дозволяє реалізувати обчислювальний (вимірювальний) алгоритм методу контролю, а також обробляти інформацію про ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ, в режимі реального часу та передавати її в програмно-обчислювальний комплекс автоматизованої системи управління (АСУ ТП) енергоблоку АЕС на пульт автоматизованого робочого місця оператора (АРМо), для прийняття рішення, щодо експлуатації негерметичних ТВЕЛ та ТВЗ ядерного реактора АЕС. При цьому, помилка вимірювань, знижена не менше ніж у 1,25 рази в порівнянні з існуючими методами вимірювання системи КГО ТВЕЛ ядерного реактора АЕС.

У дисертаційному дослідженні вирішується важлива науково-практична задача підвищення точності та надійності критерію визначення стану структури оболонки для визначення ступеня герметичності (розгерметизації) ТВЕЛ, шляхом впровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому є дистанційною, інформаційно-

вимірювальною системою контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ТВЗ ядерного реактора типу ВВЕР-1000, як підсистеми у складі АСУ ТП енергоблоку АЕС.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, алгоритм інформаційно-вимірювального модуля виявлення дефектів, системи контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, а також розроблене методичне, математичне, метрологічно-інструментальне та апаратно-програмне забезпечення, можуть знайти практичну апробацію у випробувальних стендах та науково-дослідних лабораторіях АЕС України.

Основні положення дисертації, можуть бути використані у навчальному процесі кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії при проведенні занять з дисциплін: «Системи контролю та діагностики обладнання та технологічних процесів електростанцій»; «Характеристики об'єктів керування теплових і атомних електростанцій»; «Комп'ютерне моделювання інформаційно-вимірювальних систем»; «Сучасні методи оцінки точності вимірювань»; «Підтвердження відповідності у сфері метрології та інформаційно-вимірювальної техніки»; «Системний аналіз інформаційно-вимірювальної техніки»; «Проектування та розробка інформаційно-вимірювальних систем»; «Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

– запропоновано використання фрактальної моделі ушкодження для методу контролю оболонки тепловиділяючого елементу на основі обчислювального апарату фрактальної геометрії [181, 182];

– розглянуто сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ [126];

– отримані фізичні закономірності впливу причин та факторів розгерметизації тепловиділяючих елементів ядерного реактора атомної електростанції [193];

– обґрунтовано застосування фрактально-кластерної теорії для удосконалення методу контролю оболонки ТВЕЛ [125, 158];

– запропоновано удосконалення системи контролю за герметичністю оболонки ТВЕЛ та розроблено алгоритм інформаційно-вимірювального модуля для системи КГО ТВЕЛ, як підсистеми АСУ ТП енергоблоку АЕС [246];

– розглянуто фукціонування системи АСУ ТП для позаштатних режимів роботи енергоблоку атомної електростанції [101, 243];

– розглянуті підходи та вимоги до моделювання структури з фрактальними властивостями [113, 193].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися на наукових конференціях: III Міжнародна науково-технічна конференція “Енергоефективність та енергетична безпека електро-енергетичних систем (EEES-2019)” (Харків, 2019); Міжнародна науково-практична конференція “Молодь і технічний прогрес в АПК”, (Харків, 2019); Міжнародна науково-практична конференція “Priority directions of science development. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. SPC Sci-conf.com.ua” (Lviv, 2019); International Scientific Conference «Science progress in European countries: new concepts and modern solutions»: Papers of the 10th International Scientific Conference. October (Stuttgart, 2019); IV Міжнародна науково-технічна конференція “Енергоефективність та енергетична безпека електро енергетичних систем (EEES-2020)” (Харків, 2020); V Міжнародна науково-технічна конференція “Енергоефективність та енергетична безпека електро енергетичних систем (EEES-2021)” (Харків, 2021); Міжнародна науково-технічна конференція “Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення” (Харків, 2022).

Публікації результатів дисертації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 21 наукових працях, у тому числі у 5 статтях у наукових фахових виданнях (з них 1 – стаття у науковому виданні, яке входить до наукометричної бази Scopus; 1 – стаття (розділ монографії) в країні ЄС; 3 статей у наукових фахових виданнях України); у наукових виданнях, апробаційного характеру, у тому числі опубліковано 1 патент на винахід; 5 статті, 10 тез доповідей в

збірниках конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний об'єм дисертаційної роботи становить 189 сторінок, з них обсяг основного тексту – 143 сторінок: 14 ілюстрацій на 7-ох окремих сторінках, 23 ілюстрація по тексту, 3 таблиці на 2-ох окремих сторінках, 2 таблиці по тексту, 2 додатки на 8-ти сторінках, список використаних джерел із 275 найменувань на 29-ти сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНОК ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

1.1 Аналіз вимог та критеріїв, щодо забезпечення межі пошкодження оболонки тепловиділяючих елементів

Високі економічні показники роботи, ядерна, радіаційна та екологічна безпека атомних електростанцій (АЕС), неможливі без експлуатаційної надійності тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ) тепловиділяючих збірок (ТВЗ) ядерних реакторів (ЯР) типу ВВЕР-1000 [77 – 81].

Одним з основних показників експлуатаційної надійності ТВЕЛ, є цілісність оболонки з ядерним паливом – не перевищення допустимої експлуатаційної межі розгерметизації оболонки ТВЕЛ в активних зонах ядерних реакторів, протягом усієї паливної кампанії, у всіх передбачених проектом, режимах роботи АЕС [82].

Оболонка ТВЕЛ, разом з ядерним паливом, є початковим бар’єром, що перешкоджає виходу в довкілля, накоплених в паливі радіоактивних продуктів поділу та елементів паливної композиції [83 – 85].

Розгерметизація оболонки ТВЕЛ, в процесі експлуатації, можлива внаслідок виробничого дефекту при виготовленні, через порушення умов експлуатації, внаслідок механічного пошкодження ТВЗ сторонніми предметами (дебризами), які можуть бути присутні в контурі теплоносія та ін [86 – 88].

Загальна кількість ТВЕЛ в активних зонах (АЗ) енергетичних реакторів велика: наприклад, в реакторах ВВЕР-1000, їх близько п’ятидесяти тисяч – 163 тепловиділяючі збірки по ~ 300 паливних ТВЕЛ у кожній. При такій кількості, навіть в умовах нормальної експлуатації, практично неминуча присутність в активній зоні тепловиділяючих збірок з негерметичними ТВЕЛ [89, 90].

Сучасний етап в ядерній енергетиці, характеризується збільшенням одиничної

потужності енергоблоків та тривалості паливних кампаній, високими рівнями вигоряння палива та, відповідно, зростанням енергонапруженості ТВЕЛ, посиленням умов їх експлуатації. Це призводить до різкого зростання ймовірності розвитку вторинних дефектів в оболонках, а наявність навіть одного негерметичного ТВЕЛ з вторинними дефектами, може призвести до зростання питомої активності радіонуклідів у теплоносії першого контуру до значення, близького до експлуатаційної межі. Усі ці фактори, що призводять до об'єктивної необхідності, посилення вимог до надійності збереженню ядерного палива в оболонці ТВЕЛ [91, 92].

Однією з сучасних вимог, згідно з вимогами стандарту безпеки Міжнародної агензії з атомної енергії (МАГАТЕ) «Управління активною зоною та поводження з паливом на АЕС», є концепція «нульового дефекту ТВЕЛ». У стандарті безпеки МАГАТЕ «Управління активною зоною та поводження з паливом на АЕС», що вийшов у 2020 році, надається пряма рекомендація, про неприпустимість завантаження в активну зону ТВЗ з механічними пошкодженнями та/або негерметичними ТВЕЛ. На даний момент, цього підходу дотримуються на багатьох АЕС, реалізуючи так звану концепцію «нульового дефекту ТВЕЛ» [93].

Концепція передбачає підвищення експлуатаційної надійності ядерного палива в реакторі – скорочення кількості ТВЕЛ, що розгерметизуються, до рівня $10^{-6}...10^{-5}$ (тобто один негерметичний ТВЕЛ на $10^{5}...10^{6}$ герметичних) і недопущення до подальшої експлуатації ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ. Під час зупинки ядерного реактора, проводиться виявлення та вивантаження таких ТВЗ, незалежно від розміру дефектів оболонки ТВЕЛ [94 – 96].

При цьому, на деяких зарубіжних АЕС з реакторами PWR з ТВЗ, що відпрацювали одну або дві кампанії, проводиться видалення негерметичних ТВЕЛ, з наступним встановленням на їхнє місце витіснювачів. Даний вид робіт, здійснюється на спеціально обладнаних для цієї мети станційних стендах інспекції та ремонту. Однак, наприклад, у Японії на АЕС з реакторами PWR, від практики ремонту ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ відмовилися [97, 98].

Усі дефектні ТВЕЛ ТВЗ, виявлені вже на стадії попереднього контролю

герметичності в перевантажувальній машині, вивантажуються з реактора і до подальшої експлуатації не допускаються [99].

Неоднозначно оцінюється і економія витрат, під час експлуатації ядерного палива зі значними дефектами оболонок ТВЕЛ. Економія на першому етапі (придбання ядерного палива), багаторазово перекривається економічними втратами в процесі експлуатації АЕС, насамперед через зменшення енерговироблення. До цього, призводять позапланові зупинки енергоблоку, через перевищення експлуатаційної межі за активністю радіонуклідів у теплоносії першого контуру, робота реакторної установки на зниженому рівні потужності, обмеження на маневреність енергоблоку та ін [100, 101].

Аналіз огляду [102, 103], світових виробників ТВЕЛ (фірма ”Westinghouse”) показав, що для ефективної роботи різних конструкцій та модифікацій ТВЕЛ, у різних режимах експлуатації, необхідне дотримання певних вимог до ТВЕЛ.

Роботи з удосконалення конструкції і матеріалів ТВЕЛ і ТВЗ ведуться безперервно. Проводяться дореакторні та післяреакторні дослідження ТВЕЛ, посилюються вимоги по контролю якості виготовлення ТВЕЛ і ТВЗ. Однак, випадки розгерметизації ТВЕЛ продовжують реєструватися як на українських, так і на зарубіжних АЕС [104].

Зазвичай розрізняють дві основні стадії ушкодження ТВЕЛ [94 – 96]:

– газова нещільність (рис. 1.1), коли в теплоносій потрапляють радіонукліди благородних газів (мікродефекти);

– прямий контакт ядерного палива з теплоносієм (рис. 1.2), це пошкодження, які супроводжуються виходом в теплоносій осколків поділу – попередників запізнілих нейтронів, а на подальших стадіях розвитку дефекту і фрагментів ядерного палива (макродефектів).

За даними зі звітів по Запорізькій атомній електричній станції (ЗАЕС), починаючи з експлуатації активної зони першого типу завантаження, ядерний реактор, майже кожну мікрокампанію, працював з негерметичними по газу ТВЕЛ. Дефекти типу прямий контакт палива з теплоносієм виникають значно рідше [94 – 96].

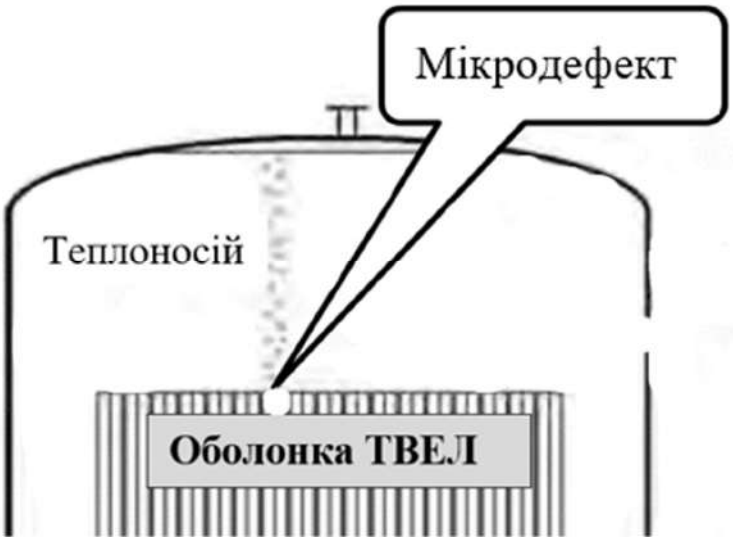


Рис. 1.1. Процес утворення ушкоджуючого дефекту оболонки ТВЕЛ типу “газова нещільність”

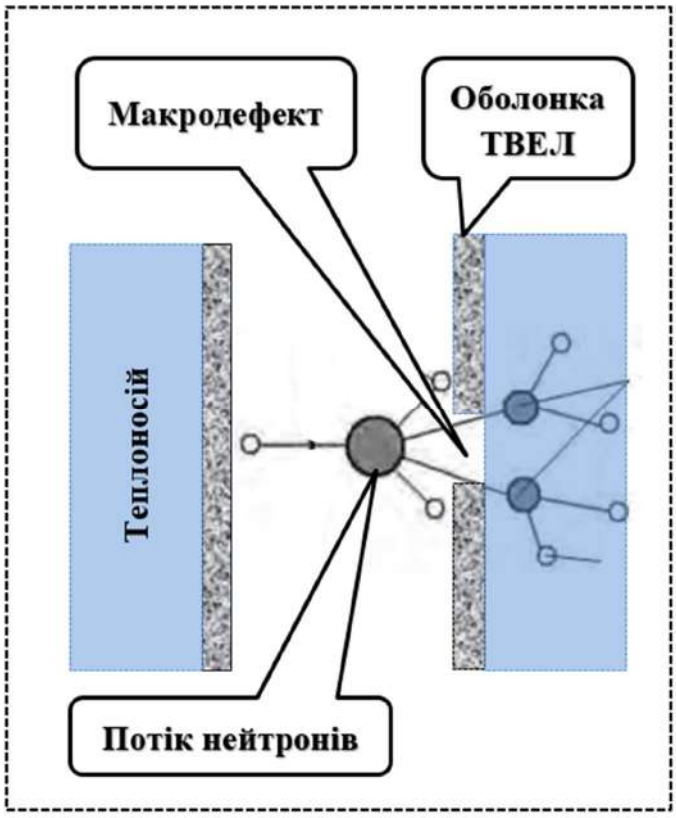


Рис. 1.2. Процес утворення ушкоджуючого дефекту оболонки ТВЕЛ типу “контакт ядерного палива з теплоносієм”

Відповідно до вимог, встановлених МАГАТЕ [94 – 96], при експлуатації ядерного реактору (ЯР) АЕС, необхідне виконання критеріїв безпеки, що унеможливлюють пошкодження та руйнування оболонок ТВЕЛ.

На українських АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000, нині в якості меж безпечної експлуатації, при оцінці рівня пошкодження оболонки ТВЕЛ, прийняті такі значення [94 – 96]:

– кількість ТВЕЛ з дефектами оболонок типу газової нещільності, тобто проникними для газоподібних продуктів розподілу, але виключають контакт палива з теплоносієм – трохи більше 1%;

– кількість ТВЕЛ з дефектами оболонок, що допускають не тільки вихід з паливного елемента продуктів поділу, а й прямий контакт палива з теплоносієм – не більше 0,1%.

Дефекти оболонок із розмірами 10...50 мкм вважаються дефектами типу газової нещільності (рис. 1.1).

В якості розміру пошкодження оболонки ТВЕЛ, що дозволяє вважати, що є прямий контакт палива з теплоносієм (рис .1.2) і вихід з палива, як продуктів поділу, так і елементів паливної матриці, прийнятий еквівалентний діаметр отвору в оболонці більше 50 мкм.

Межа нормальної експлуатації активності теплоносія ядерного реактора, відповідає наявності в активній зоні приблизно 10 ТВЕЛ, з дефектами типу прямий контакт ядерного палива і теплоносія і 100 газонещільних ТВЕЛ.

Можливі такі варіанти виникнення і виявлення дефектів оболонки при виготовленні і експлуатації ТВЕЛ [105]:

– негерметичний ТВЕЛ, що не виявлений на заводі, не проявив себе при експлуатації. Наскрізний дефект в оболонці ТВЕЛ має такі властивості, що в умовах роботи ядерного реактора і не проявить себе. Це може стосуватися дефектів розміром до декількох мікрон;

– заводський брак, виявлений на заводі. Зокрема, з 1978 року до 2018 року (40 років) на українських АЕС було виявлено 28 негерметичних ТВЕЛ;

– негерметичний ТВЕЛ, що не виявлений на заводі, який виявив себе при

експлуатації. Застосовувана в даний час технологія виготовлення і багатоступінчастого контролю технологічного процесу практично виключає випуск негерметичного палива. Імовірність пропуску негерметичного ТВЕЛ оцінюється фахівцями величиною менше 10^{-10};

– помилкова негерметичність при експлуатації. Є випадки визнання негерметичними ТВЗ, які мали підвищений радіаційний фон через відкладення на поверхні оболонки ТВЕЛ, величина якого перевищувала статистичний рівень фону інших ТВЗ;

– розгерметизація при експлуатації – основна причина появи негерметичних ТВЕЛ.

Розглянемо критерії індивідуального відбракування ТВЕЛ ТВЗ. При експлуатації ядерного реактора АЕС, можливі значні порушення цілісності оболонки ТВЕЛ, які помітні навіть при візуальному огляді ТВЗ: поперечний перелом, відсутність фрагмента або верхньої заглушки ТВЕЛ, тріщини різної конфігурації та розміру, наскрізні отвори та ін [106, 107].

В якості еталонного руйнування, при якому подальша експлуатація ТВЗ є неприпустимою, прийнятий поперечний перелом ТВЕЛ. Особливо небезпечним випадком порушення цілісності оболонки ТВЕЛ, вважається перелом оболонки, оскільки передбачається, що вібрація кінців такого ТВЕЛ буде інтенсифікувати висипання таблеток ядерного палива з ТВЕЛ в теплоносій першого контуру. Кількісна оцінка допустимого ступеня розгерметизації ТВЕЛ для різних проектів ТВЗ, визначена в технічних умовах або договорах на постачання ТВЗ. Критерієм відмови (індивідуального відбракування) ТВЗ з негерметичності ТВЕЛ, є перевищення питомої активності реперного радіонукліда ^{131}I, що встановлюється за результатами випробувань ТВЗ на стенді контролю герметичності оболонок ТВЕЛ, значення яких задаються в документах. Ступінь розгерметизації ТВЕЛ, залежить від конструкції ТВЗ. На енергоблоках з ядерними реакторами типу ВВЕР-1000, ТВЕЛ ТВЗ розгерметизується від 2,3 10^{-5} до 1,5 10^{-4}.

Для виявлення негерметичних ТВЕЛ ТВЗ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000, розроблено стенди інспекції та ремонту ТВЕЛ ТВЗ. Такий стенд дозволяє, в умовах

басейну витримки, проводити детальний огляд і визначати геометричні параметри ТВЕЛ ТВЗ, здійснювати пошук негерметичних ТВЕЛ у негерметичних ТВЗ, видаляти за допомогою спеціальних інструментів негерметичні ТВЕЛ з пучка і на їх місце встановлювати витискувачі [108].

1.2 Аналіз факторів та причин виникнення ушкоджуючих дефектів на зовнішній та внутрішній поверхні та їх вплив на структурно-фазові зміни в об’ємі матеріалу оболонки ТВЕЛ

1.2.1 Загальні властивості оболонок тепловиділяючих елементів ядерного реактора типу ВВЕР-1000

Надійна герметичність оболонок ТВЕЛ ТВЗ ядерного реактора типа ВВЕР-1000, яка запобігає виходу радіоактивних уламків поділу з ядерного палива, гарантує ядерну та радіаційну безпеку АЕС та навколишньої місцевості.

Герметичність оболонок ТВЕЛ, повинна зберігатися протягом усього терміну роботи ТВЗ ядерного реактора АЕС та подальшого зберігання відпрацьованого ядерного палива до відправки на переробку [94 – 96].

У зв'язку з цим, властивості матеріалу оболонок ТВЕЛ, повинні задовольняти вимогам корозійної стійкості, міцності та пластичності в умовах нормальної роботи ядерного реактора АЕС і максимального розігріву в аварійних ситуаціях. Однією з основних вимог до матеріалу оболонок ТВЕЛ, є малий перетин захоплення нейтронів. Для цього, в якості матеріалу оболонки ТВЕЛ, використовується цирконій і його сплави. Перевага цирконію, полягає у вдалому поєднанні ядерних та фізичних характеристик з механічними та корозійними властивостями. Цирконій корозійно стійкий у більшості середовищ, що застосовуються в якості теплоносія ядерних реакторів, і досить технологічний. Висока температура плавлення цирконію, відкриває широкі можливості для пошуку сплавів, досить стійких у воді при підвищених температурах. Вибору матеріалу оболонок ТВЕЛ на основі сплавів цирконію, присвячено низку науково-дослідних робіт , в яких вивчені властивості та

радіаційні характеристики сплавів цирконію з ніобієм, танталом, хромом, оловом, залізом, нікелем та іншими елементами. Систематизація робіт з корозії цирконію та її сплавів проведено у роботах [109, 110].

Розглянемо властивості цирконієвих оболонок ТВЕЛ, на прикладі оболонок із сплаву цирконію з одним ваговим відсотком ніобію (цирконієвий сплав Zr+1 % Nb), який використовується в енергетичних реакторах ВВЕР-1000 ЗАЕС (1 – 4 блоки). Пластичні властивості цирконієвої трубки для оболонки ТВЕЛ погіршуються після опромінення, загальне відносне подовження на зразках, опромінених у дозі 6,4 10^{20} нейтр/см^2, може становити в середньому 14…18 %, тобто до ~ 60 см. Зі збільшенням температури, властивості міцності зразків погіршуються, а пластичні властивості покращуються. Найбільш різко властивості оболонки ТВЕЛ змінюються в інтервалі 400÷500°С. Оскільки оболонки дослідних та штатних ТВЕЛ, несуттєво гідруються під час роботи в ядерному реакторі АЕС, зміни їх механічних властивостей, в основному визначаються процесом радіаційного зміцнення та мало відрізняються від змін властивостей кільцевих зразків при реакторних випробуваннях [111, 112].

У перший період роботи ТВЕЛ в реакторі, характеристики оболонок міцності суттєво збільшуються, а пластичні характеристики знижуються. Надалі зміна властивостей стає менш помітною і врешті-решт досягає насичення [113].

Тому виникає необхідність вдосконалення існуючих або розробка нових неруйнівних методів виявлення негерметичних тепловиділяючих елементів без поелементного розбирання тепловиділяючої збірки. Радіаційна безпека ядерних реакторів багато в чому забезпечується системою фізичних бар'єрів, що перешкоджають розповсюдженню радіоактивних елементів як усередині реактора, так і за його межі – у навколишнє середовище [114].

Основним джерелом радіоактивних елементів у ядерному реакторі, є ТВЕЛ, усередині яких відбуваються ядерні реакції та виділення тепла. Металева герметична захисна оболонка ТВЕЛ, виконує функцію одного з перших фізичних бар'єрів і повинна зберігати свою герметичність протягом усього часу експлуатації ТВЕЛ. Надійність ТВЕЛ постійно підвищується. Так, показник рівня розгерметизації ТВЕЛ – знаходиться в діапазоні від 10^{-5} до 10^{-6} [94 – 96].

Проте навіть поодинокі випадки розгерметизації оболонки ТВЕЛ можуть призвести до помітних економічних втрат для АЕС, а також додаткових дозових навантажень для обслуговуючого персоналу.Тому виявлення негерметичних ТВЕЛ, встановлення причин їхньої розгерметизації, визначення типів дефектів, їх розмірів та розташування, важливе як з точки зору безпеки експлуатації АЕС, так і з науково-технічної, при вдосконаленні та розробці нових типів ядерного палива. Таким чином, результати аналізу експлуатації та ресурсних випробувань ТВЕЛ ТВЗ, досвід роботи енергетичних ЯР типу ВВЕР-1000 діючих АЕС України, а також результати післяреакторних досліджень свідчать про необхідність удосконалення методів контролю герметичності оболонок ТВЕЛ у процесі їх розгерметизації.

1.2.2 Загальні відомості про конструкцію та основні геометричні параметри тепловиділяючого елемента

В даний час на енергоблоках АЕС з ядерними реакторами типу ВВЕР-1000, експлуатуються два типи ТВЗ, що відрізняються один від одного в першу чергу конструкцією каркаса – це ТВЗ-2 (рис. 1.3 а), ТВЗА (рис. 1.3 б) та їх модифікації [115, 116].

Кожна ТВЗ містить 312 ТВЕЛів, які розташовані по гексагональній решітці з кроком 12,75 мм. Каркас складається з головки та хвостовика ТВЗ, з'єднаних між собою центральною трубою (ЦТ) і 18 напрямними каналами (НК), в яких переміщуються поглинаючі стрижні системи управління та захисту реактора (ПС СУЗ).

Напрямні канали з'єднані з головкою за допомогою цангового з'єднання, завдяки якому вона може дистанційно демонтуватися, а потім встановлюватися на місце. У нижній частині ТВЗ НК та ЦТ приварені до нижньої решітки, яка, у свою чергу, приварена до хвостовика.

Кріплення ТВЕЛ у ТВЗ, здійснюється установкою нижньої заглушки ТВЕЛів, що має цанговий хвостовик, в нижню решітку, а дистанціювання ТВЕЛ по гексагональних решітках забезпечується 15 або 12 дистанційними решітками (ДР),

розташованими по висоті ТВЗ. Відмінність у конструкціях каркасу ТВЗ-2 і ТВЗА полягає в способах кріплення ДР і наявності куточків жорсткості у ТВЗА, розташованих по ребрах збірки (рис. 1 б). У ТВЗ-2 ДР приварені до ПК, а у ТВЗА – до куточків. [117, 118]

Тепловиділяючі елементи у складі ТВЗ є найбільш відповідальними елементами, для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки, в процесі експлуатації ядерних енергетичних реакторів АЕС. Конструкція і матеріали ТВЕЛ ТВЗ повинні забезпечувати їх надійність, при високій щільності енерговиділення і при великих глибинах вигоряння, також виконують функції бар'єрів безпеки, що запобігають виходу високоактивних продуктів поділу у теплоносій [119 – 121].

При виборі конструкції ТВЕЛ та його розмірів необхідно враховувати наступні фактори [119 – 121]:

– чим більше відношення поверхні до об’єму, тим менша напруженість одиниці поверхні ТВЕЛ;

– зі зростанням відношення поверхні до об’єму ТВЕЛ, зменшуються розміри активної зони, але одночасно зростає частка конструкційних матеріалів, знижуються міцнісні та вібраційні характеристики ТВЕЛ;

– поперечні розміри ТВЕЛ повинні зменшуватися зі збільшенням температури теплоносія та теплових потоків, а також зі зменшенням теплопровідності палива;

– конструкція та розміри ТВЕЛ, суттєво впливають на параметри розмножуючого середовища та завантаження ядерного палива в реактор.

Існує досить багато конструктивних геометричних форм ТВЕЛ: блочкові, стрижневі, кільцеві, трубчасті, пластинчасті, стрічкові, кульові, призматичні та інші форми в оболонках зі сплавів алюмінію, заліза, цирконію, кераміки.

Основним конструкційним елементом активної зони ЯР типу ВВЕР-1000, є ТВЕЛ, що є стрижнем, який складається з цирконієвої оболонки (сплав Е110: Zr + l% Nb), стовпа таблеток з двоокису урану (UO_2) всередині трубки (рис. 1.4).

Зовнішній діаметр оболонок 9,15 мм, довжина 4000 мм, товщина стінки 0,65 мм (залежить від модифікацій ТВЕЛ). Зверху та знизу оболонка герметизується привареними заглушками, стовп із паливних таблеток фіксується від переміщення

всередині ТВЕЛа за допомогою пружини.

У верхній частині ТВЕЛ таблетки ядерного палива відсутні, ця частина називається «газозбірник» і служить для компенсації тиску всередині ТВЕЛа при виході з таблеток газових продуктів поділу ядерного палива під час експлуатації в реакторі.

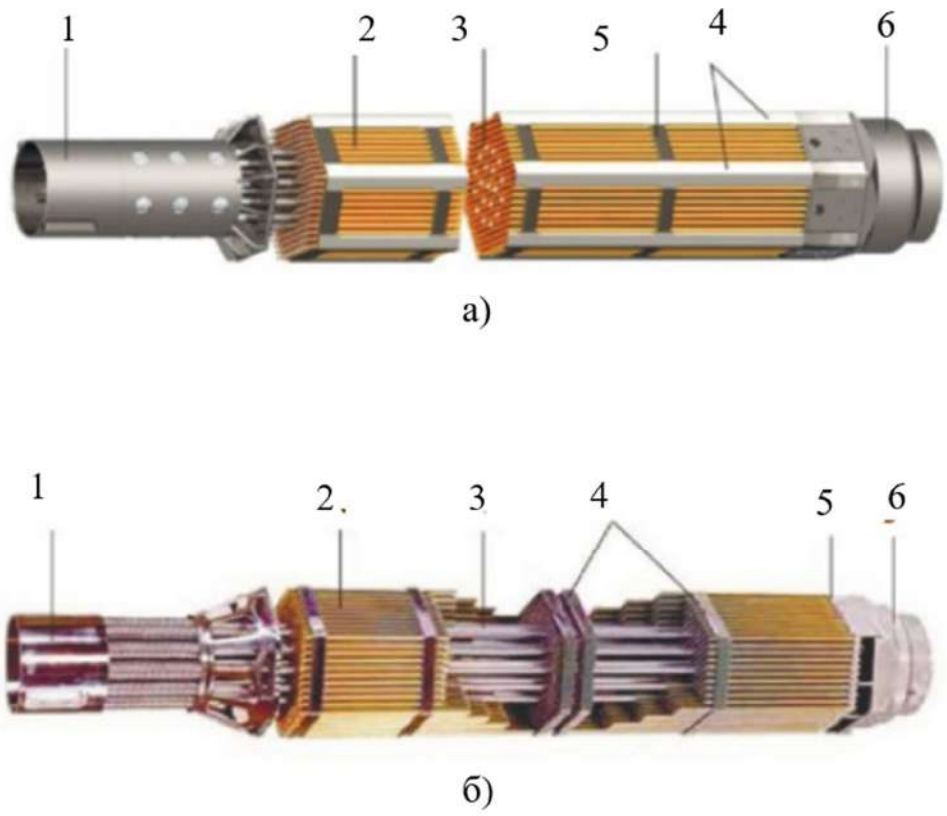


Рис. 1.3. Схема конструкції ТВЗ: а) ТВЗ-2; б) ТВЗА: 1. - головка тепловиділяючої збірки; 2. - обід дистанційної щітки; 3. - напрямний канал; 4. - дистанційна щітка; 5. - тепловиділяючі елементи; 6. – хвостовик

Внутрішній об'єм ТВЕЛ заповнений гелієм під тиском 2,0 МПа. Тепловиділяючі елементи, впорядкованим чином зібрані ТВЗ, які встановлюються в активну зону ядерного реактора.

Крім упорядкованого розташування ТВЕЛ в АЗ ядерного реактора, ТВЗ забезпечують відведення тепла від ТВЕЛ шляхом прокачування через складання

теплоносія (вода).

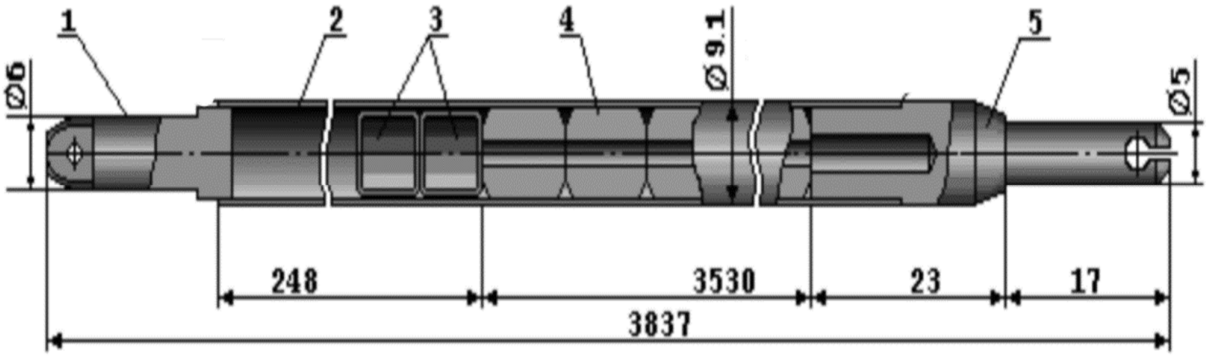


Рис. 1.4. Тепловиділяючий елемент реактора ВВЕР-1000: 1 – верхня заглушка; 2 – оболонка, сплав Zr +1% Nb; 3 – фіксатор, нержавіюча сталь; 4 – таблетка, двоокис урану; 5 – заглушка нижня

Також виконання транспортно-технологічних операцій при завантаженні-вивантаженні ядерного палива з реактора. Основні конструктивні характеристики та геометричні параметри ТВЕЛ ТВЗ ЯР типу ВВЕР-1000 наведені в таблиці 1.1. Обґрунтування безпеки реакторної установки включає аналіз поведінки ТВЕЛ в умовах проектних аварій [122].

У проектних аваріях потрібне виконання критеріїв безпеки (табл. 1.2), що виключають таку руйнацію ТВЕЛ, при якій не забезпечуються охолоджуваність та розбирання активної зони після аварії [123, 124].

Під терміном “руйнування ТВЕЛ”, слід розуміти, порушення конструкції ТВЕЛ, як складальної одиниці активної зони або ТВЗ, в результаті фрагментації або плавлення, що призводить до прямого контакту палива з теплоносієм.

Таблиця 1.1

Конструктивні характеристики та геометричні параметри ТВЕЛ

Параметри	Розмір параметра
Зовнішній діаметр оболонки	9,15 мм
Внутрішній діаметр оболонки	7,73 мм
Товщина оболонки	0,69 мм
Діаметр паливної таблетки	7,57 мм
Діаметр центрального отвору таблетки	2,4 мм
Зазор між таблеткою та оболонкою	0,75 мм
Діаметр еквівалентного проточного каналу	16 мм
Геометрична висота конструкції оболонки	3530 мм
Висота таблетки	11,8 мм
Геометрична довжина конструкції оболонки	3837 мм
Початкова товщина оксидної плівки для кожного аксіального сегмента	0,1 мкм
Максимальна товщина окисної плівки	60 мкм

Таблиця 1.2

Критерії безпеки

Формулювання критерію	Мета запровадження критерію
Максимальна температура оболонки трохи більше 1200 ^{0}C	Відсутність виникнення пароцирконієвої реакції, що самопідтримується, яка необхідна для забезпечення охолоджуваності активної зони
Максимальна локальна глибина окислення оболонки більше 18% від її початкової товщини	Обмеження крихтування оболонок, необхідне для відсутності фрагментації ТВЕЛ при затоці, і навіть можливість вивантаження активної зони
Частка цирконію, що прореагувала з парою, в активній зоні, не більше 1% його маси в оболонках ТВЕЛ	Обмеження кількості водню, що утворився в пароцирконієвій реакції, необхідно, щоб не допустити утворення вибухонебезпечної суміші
Температура палива нижче температури плавління	Відсутність взаємодії розплавленого палива з оболонкою, необхідна для збереження геометрії активної зони, що охолоджується, і можливості її вивантаження
Усереднена за перерізом палива в ТВЕЛ ентальпія не більше 230 кал/г (963 кДж/кг)	Відсутність фрагментації ТВЕЛ в умовах швидкого виділення енергії в аварії зі зростанням реактивності, необхідна для збереження геометрії активної зони, що охолоджується, і можливості її вивантаження

1.2.3 Аналіз фізичних явищ, факторів та причин ушкодження та руйнування оболонки тепловиділяючого елемента

1.2.3.1 Аналіз фізичних явищ та процесів, що впливають на пошкодження та руйнування оболонки тепловиділяючого елемента

Проведемо аналіз фізико-хімічних процесів в матеріалі оболонки тепловиділяючого елемента в процесі експлуатації ЯР типу ВВЕР.

Вважається встановленим, що в матеріалі оболонок ТВЕЛ ЯР ВВЕР в процесі експлуатації відбуваються такі основні фізико-хімічні процеси [125, 126]:

– радіаційне зміцнення та зниження пластичності;

– радіаційна та термічна повзучість;

– радіаційне зростання;

– термомеханічна взаємодія між паливом та оболонкою;

– прогину ТВЕЛ, який пов'язаний з термомеханічною взаємодією в пучку.

Розгляд та аналіз фізичних явищ, які в періоди експлуатації ТВЕЛ з цирконієвими оболонками, призводять до їх пошкодження та руйнування, показав, що найбільш значними з них є [125, 126]:

– перегрів оболонки ТВЕЛ понад 1200 ^{0}С, що породжує процеси плинності, повзучості тощо;

– підвищена корозія через відкладення на поверхні оболонки, продуктів корозії контуру, що призводить до утворення локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин;

– внутрішньотільне локальне гідрування оболонок ТВЕЛ;

– зминання циліндричної форми поверхні ТВЕЛ, що призводить до зміни товщини оболонки, а також її зовнішнього та внутрішнього діаметра;

– взаємодія таблеток ядерного палива з оболонкою, що призводить до зменшення зазору між ТЯП та внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, розглянуті вище фізичні явища і процеси, можуть викликати ушкоджуючи дефекти на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ, а також у всьому об’ємі структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.