

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 ТЕПЛОВИДЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна 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 тепловіділяючого елемента, який на відміну від відомих, дозволяє визначити місце розташування, тип та розміри дефекту на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки, без вилучення тепловіділяючого елемента з тепловіділяючої збірки, на основі подальшого розвитку аналітичних виразів удосконаленої моделі ушкодження та деформування оболонки тепловіділяючого елемента та визначення критерію оцінки ступеня розгерметизації у вигляді кількісної величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах по висоті тепловіділяючого 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 тепловіділяючих 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 тепловіділяючого 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 тепловіділяючого 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 тепловідляючого 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 тепловідляючого 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 тепловідляючого елемента.

Визначено, що у моделі тепловідляючого 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, визначити фактичний критерій оцінки ступеня герметичності (розгерметизації) елемента.

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 контролю, 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 елемента 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, інформаційно-вимірювальна система, тепловиділяючий елемент

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

I. 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.

II. 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. *III 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.

III. 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 елемента 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 ТЕПЛОВИДЛЯЮЧИХ 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 твेलів
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 вигорання 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, вихроструміві 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 ($\ll 1$ Гц), розглядається повзучість оболонки ТВЕЛ, без врахування 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:

- врахування 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» УПА, 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 фрактальній 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 елемента 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 функціонування 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 електроенергетичних 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 електроенергетичних систем (EEES-2020)” (Харків, 2020); V Міжнародна науково-технічна конференція “Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних 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 вигорання 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 агенції 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 $10^{-6} \dots 10^{-5}$ (тобто один негерметичний ТВЕЛ на $10^5 \dots 10^6$ 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 перебивається 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 теплоносії потрапляють радіонукліди благородних газів (мікродефекти);

– прямий контакт ядерного палива з теплоносієм (рис. 1.2), це пошкодження, які супроводжуються виходом в теплоносії 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 кожен мікрокампанію, працював з негерметичними по газу ТВЕЛ. Дефекти типу прямий контакт палива з теплоносієм виникають значно рідше [94 – 96].

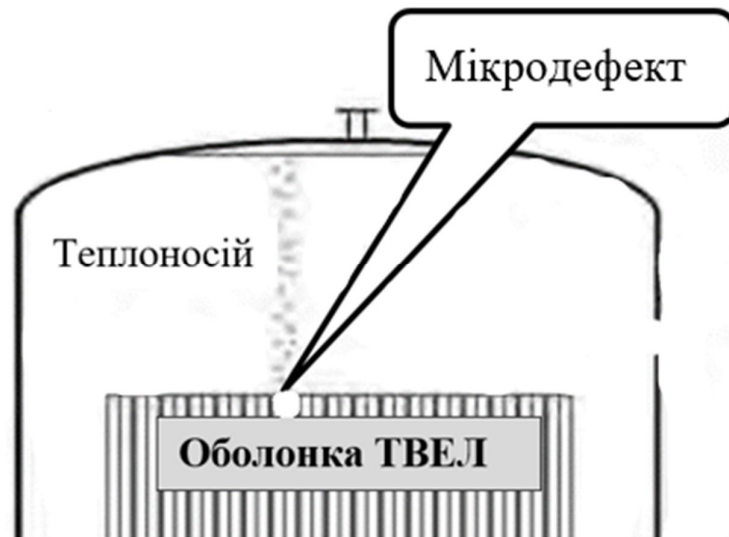


Рис. 1.1. Процес утворення ушкоджуючого дефекту оболонки ТВЕЛ типу “газова нещільність”

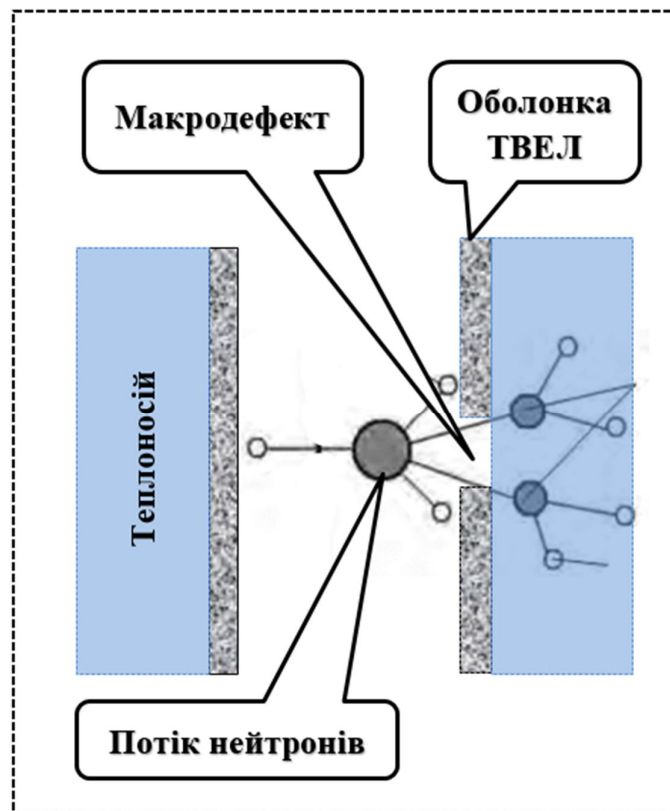


Рис. 1.2. Процес утворення ушкоджуючого дефекту оболонки ТВЕЛ типу “контакт ядерного палива з теплоносієм”

Відповідно до вимог, встановлених МАГАТЕ [94 – 96], при експлуатації ядерного реактору (ЯР) АЕС, необхідне виконання критеріїв безпеки, що унеможливають 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 $2,3 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$.

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 $6,4 \cdot 10^{20}$ нейтр/см², 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°C. 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 вигорання, 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 E110: Zr + 1% 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.

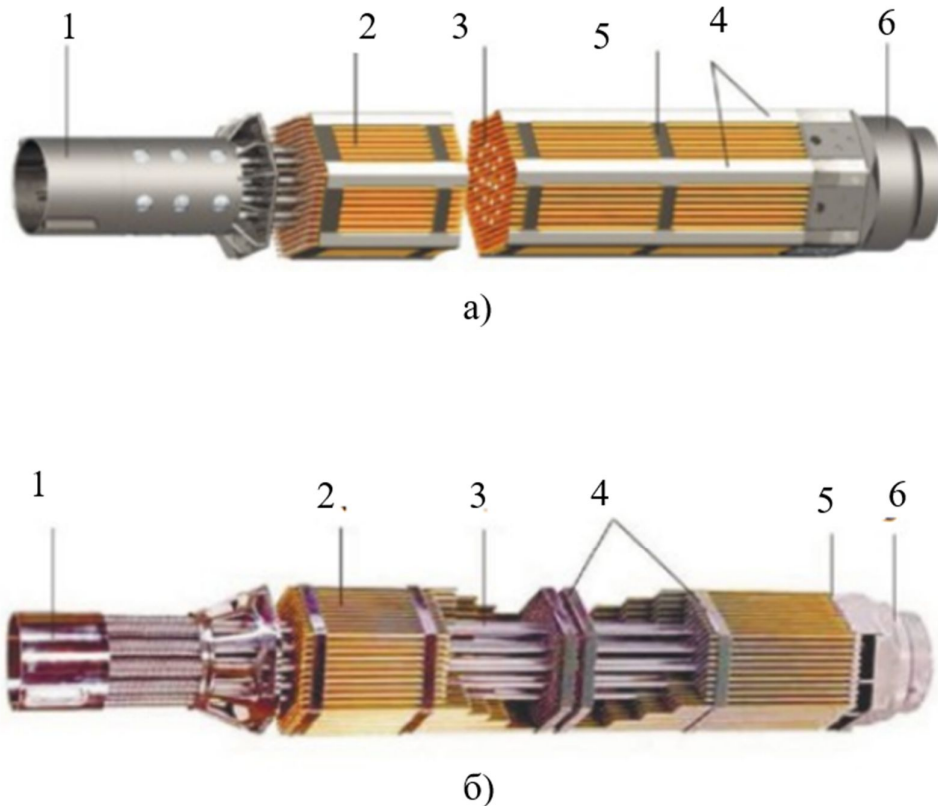


Рис. 1.3. Схема конструкції ТВЗ: а) ТВЗ-2; б) ТВЗА: 1. - головка тепловідляючої збірки; 2. - обід дистанційної щітки; 3. - напрямний канал; 4. - дистанційна щітка; 5. - тепловідляючі елементи; 6. – хвостовик

Внутрішній об'єм ТВЕЛ заповнений гелієм під тиском 2,0 МПа. Тепловідляючі 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).

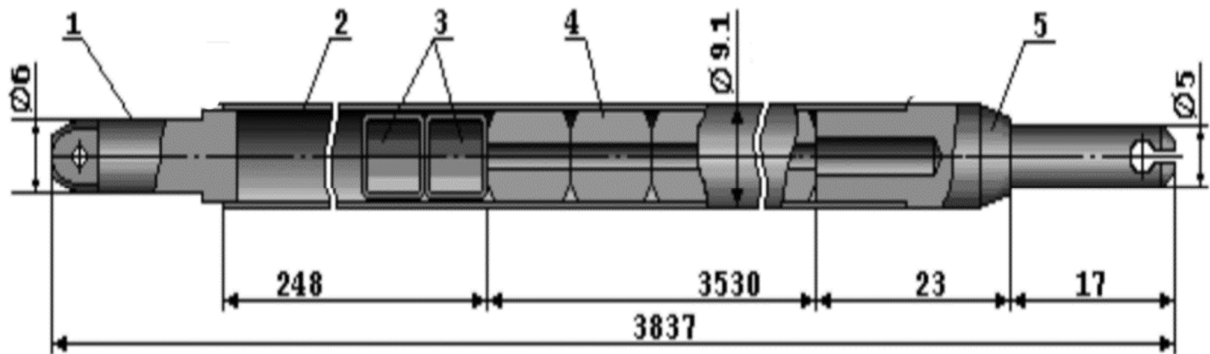


Рис. 1.4. Тепловіділяючий елемент реактора ВВЕР-1000: 1 – верхня заглушка; 2 – оболонка, сплав Zr +1% Nb; 3 – фіксатор, нержавіюча сталь; 4 – таблетка, двоокис урану; 5 – заглушка нижня

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 °С	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 плавлення	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 °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;
- змінання 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 ушкоджуючі дефекти на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ, а також у всьому об'ємі структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

При цьому в структурі матеріалу оболонки утворюються локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини, а як результат, виникають наскрізні тріщини, які призводять до розгерметизації ТВЕЛ і викиду продуктів поділу ядерного палива (ЯП) в теплоносій [125, 126]:

У зв'язку з цим необхідно дослідити і вивчити характер і ступінь можливих пошкоджень і руйнувань оболонки ТВЕЛ при різних технологічних та експлуатаційних факторах при працездатності ТВЕЛ.

1.2.3.2 Аналіз видів і причин утворення ушкоджуючих дефектів на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ

Розглянемо види та причини утворення ушкоджуючих дефектів на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ. Слід зазначити, що багато причин часто пов'язаних між собою, перетинаються чи накладаються друг на друга. При цьому, як відомо [12, 13], у багатьох випадках (20%), причини виходу ТВЕЛ з ладу залишаються невідомими.

У роботах [14, 15], показано, що значна увага приділяється зміні розмірів цирконієвої оболонки ТВЕЛ, в залежності від зовнішніх умов експлуатації та внутрішньотвельних механізмів впливу.

У роботі [16], результати післярадіаційних досліджень 800 ТВЕЛ SGHWR, показали, що при експлуатації, ТВЕЛ подовжилися приблизно на 0,4% (16 мм), що призвело до пошкодження та розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Зміна діаметра та форми в поперечному перерізі відбувається через [12 – 16]:

- радіаційне ущільнення ТЯП, внаслідок чого між ТЯП та оболонкою утворюються зазори, в які нерівномірно вдавлюється оболонка за рахунок повзучості, під тиском теплоносія;

- досить високих вигорань ТЯП, що викликають крихкість.

Зм'яття оболонки ТВЕЛ призводять до наступних наслідків:

- у місцях найбільш різких змін форми оболонки, радіус кривизни на зім'ятій ділянці може досягати 0,5...0,6 мм;

– локальна деформація може сягати понад 20%.

Таким чином, перевищення встановлених значень радіусу кривизни та локальної деформації на зім'ятих ділянках можуть призвести до виникнення наскрізних тріщин в оболонці ТВЕЛ.

При цьому важливе значення мають вихідні допуски в оболонках на овальність, на ексцентриситет, які особливо проявляються при знижених властивостях міцності оболонок ТВЕЛ.

Механічна взаємодія ТЯП з оболонкою (ефект подовження ТВЕЛ) виникає при зміні режимів коливання потужності ЯР і залежить:

- від зміни діаметрального зазору між паливом та оболонкою;
- від довжини, форми та щільності ТЯП;
- від товщини та міцності оболонки ТВЕЛ.

У роботах [12 – 16], було встановлено, що подовження ТВЕЛ, зростає зі збільшенням висоти та щільності ТЯП.

Зі зменшенням початкового діаметрального зазору, зі зменшенням товщини та міцності оболонки.

Вигини оболонки ТВЕЛ (викликають дотик та локальні перегриви оболонки), виникають через наступні фактори та причини [12 – 16, 127]:

- вичерпання проектного запасу на подовження у зазорах між ТВЕЛ та кінцевими деталями ТВЗ або конструкціями ядерного реактора;
- залишкові напруги в оболонках, що виникли під час виготовлення, і навіть під час експлуатації ТВЕЛ;
- радіаційне зростання матеріалу оболонки;
- низький рівень термомеханічної обробки матеріалу оболонки;
- перепад температури за радіусом ТВЗ та перерізом оболонки ТВЕЛ;
- жорстка механічна взаємодія оболонки з решіткою ТВЗ;
- різноосність оболонки та її взаємодія з ТЯП.

Явище радіаційного розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, пов'язане з тим, що цирконієвий сплав, який опромінюється, пересичений точковими дефектами [18, 19].

Отже, є причиною появи та розвитку об'ємних скупчень у вигляді вакансійних пір (розміром близько 10 нм), що призводить до загального збільшення його об'єму (до 6%), тобто до розпухання [128].

До небажаних наслідків розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, слід віднести деформацію, вигини та збільшення геометричних розмірів ТВЕЛ.

В результаті цього, може відбутися самозварювання та заклинювання окремих елементів ТВЕЛ, а також перегрів всередині працюючих елементів ТВЕЛ, що призведе до зниження ступеня герметичності ТВЕЛ.

Таким чином, питання про розмірні зміни геометричних параметрів ТВЕЛ реактора типу ВВЕР-1000 вимагає постійної уваги і вивчення, оскільки воно може виявитися одним з вирішальних факторів, що призводить до руйнувань оболонки ТВЕЛ.

Розгляд та аналіз основних факторів та причин, що впливають на зміну геометричних параметрів ТВЕЛ, які можуть призвести до пошкодження та розгерметизації оболонки ТВЕЛ, показав та виявив найбільш ймовірні ділянки пошкодження оболонки ТВЕЛ, через внутрішні чинники, до яких відносяться (рис. 1.5) [129]:

- окислення, плавлення та переміщення елементів активної зони;
- вихід продуктів поділу з газового зазору в перший контур;
- вихід продуктів поділу з таблетки ядерного палива в газовий зазор;
- деформація та розрив оболонки;
- накопичення продуктів поділу в зазорі між таблетками ядерного палива та внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, зміна діаметра та довжини ТВЕЛ, в процесі експлуатації обумовлені розмірними змінами цирконієвих оболонок ТВЕЛ.

При цьому, розглядаючи зміну геометричних параметрів ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000, у процесі експлуатації можна виділити дві основні стадії:

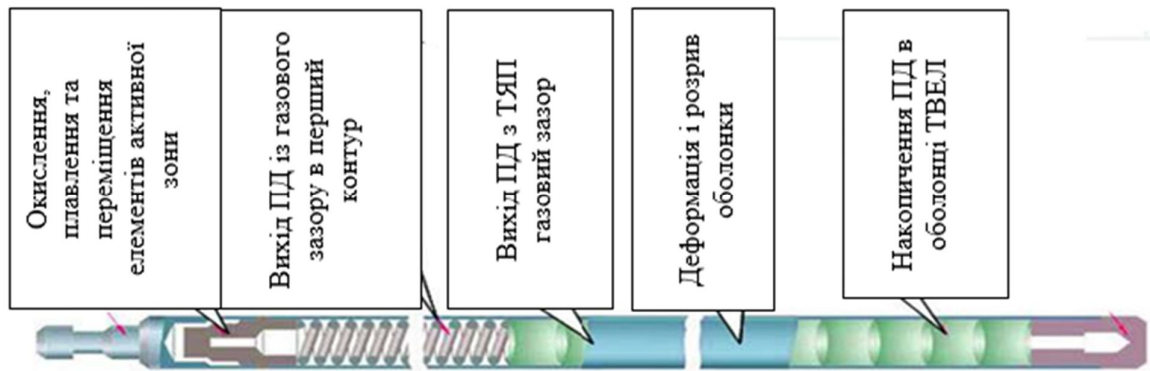


Рис. 1.5. Основні ймовірні ділянки пошкодження оболонки ТВЕЛ через внутрішні чинники

перша стадія – до виникнення контакту між паливом та оболонкою:

- зменшення діаметра оболонки за рахунок радіаційно-термічної повзучості під дією перепаду тисків контур-ТВЕЛ;

- подовження ТВЕЛ за рахунок радіаційного зростання, повзучості в осьовому напрямку та впливу з боку паливного сердечника за механізмом “храповика” (якщо відбувається заклинювання таблеток).

друга стадія – після виникнення щільного контакту між паливом та оболонкою:

- збільшення діаметра оболонки за рахунок збільшення (розбухання) вигорання таблеток ядерного палива.

1.2.3.3 Дослідження механізму розгерметизації ТВЕЛ

Розглянемо механізм розгерметизації оболонки ТВЕЛ за різних умов експлуатації.

Як відомо [130 – 135], під механізмом розгерметизації оболонки ТВЕЛ, розглядається процес локального роздуття оболонки ТВЕЛ під дією надлишкового внутрішнього тиску з утворенням поздовжньої тріщини, при цьому в поздовжньому та окружному напрямку деформування оболонки характеризується великими пластичними деформаціями, у радіальному напрямку практично 100% утоншення місця розриву.

Як відомо [130 – 135], конструкційні матеріали оболонки ТВЕЛ працюють в екстремальних умовах: за високих температур, великих механічних напругах, високих дозах опромінення.

У термоядерних пристроях ядерних реакторів АЕС, кристалічна структура матеріалів оболонок ТВЕЛ, постійно зазнає змін на атомному рівні: у ній утворюються різні типи дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин, які призводять до таких фізичних ефектів як: розпухання, крихкання, зміцнення, повзучість, плинність, набрякання.

Розглянемо зміни фізичних властивостей та структурно-фазового стану, що відбуваються у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, під впливом різних зовнішніх та внутрішніх ушкоджувальних дефектів.

Радіаційні дефекти відбуваються у матеріалах структури оболонки ТВЕЛ ядерного реактора АЕС, тобто там, де матеріали стикаються з інтенсивними потоками опромінення. Через появу великої кількості радіаційних дефектів, матеріали структури оболонки ТВЕЛ змінюють свої фізичні властивості: електропровідність, міцність, об'ємні розміри і навіть елементний склад через появу в них ізотопів нових елементів. Крім того, були виявлені абсолютно нові явища, що відбуваються з опроміненими металами та сплавами оболонки ТВЕЛ: радіаційне крихтіння, прискорена дифузія, радіаційно-індуковані фазово-структурні перетворення; радіаційно-стимульована дифузія; радіаційно-індуковані фазові перетворення у твердих тілах; блістеринг (утворення газових бульбашок поблизу поверхні кристалів); утворення зверхрешітчастих дефектів та багато іншого [136, 137].

Розглянемо явище радіаційного розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, яке пов'язане з тим, що цирконієвий сплав ($Zr + 1\% Nb$), який опромінюється, пересичений точковими дефектами, а, отже, є причиною зародження та розвитку об'ємних скупчень у вигляді вакансійних пір (розміром близько 10 нм), що призводить до загального збільшення об'єму (до 6%), тобто до розпухання. До найнебажаніших наслідків розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ слід віднести деформацію, вигини та збільшення геометричних розмірів ТВЕЛ, що може призводити до самозварювання та заклинювання окремих елементів ТВЕЛ, а також

перегріву всередині працюючих елементів ТВЕЛ [138 – 140].

Результати експериментальних досліджень радіаційного розпухання, проведені в роботах [136 – 140], показали закономірності ступеня розпухання матеріалу: залежність від температури, інтенсивності та потоків опромінення, механічних напруг, а також стану структури та хімічного складу матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Розглянемо ефект радіаційного зміцнення та крихтування матеріалу оболонки ТВЕЛ, який утворюється у процесі опромінення.

Як відомо [136 – 140], радіаційні дефекти викликають суттєву зміну характеристик міцності матеріалу (напруга зсуву, межі плинності та міцності, твердість).

В результаті опромінення матеріалу оболонки ТВЕЛ, майданчик плинності як би згладжується і межа плинності за своєю величиною наближається до руйнівної напруги.

У роботах [136, 140] показано, що межі плинності цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ збільшуються зі зростанням дози опромінення. Тому ефект зростання межі плинності під опроміненням викликає радіаційне зміцнення.

Отже, радіаційне зміцнення майже завжди супроводжується значним зменшенням пластичності опромінених матеріалів – явищем радіаційного крихтіння. Тому неважко припустити, що між радіаційним зміцненням та охрупчуванням існує певний зв'язок. З'ясування природи явища радіаційного зміцнення дозволяє встановити можливі причини радіаційного крихтіння.

У роботі [141] наголошується, що основними причинами радіаційного крихтіння є зменшення пластичності опроміненого матеріалу оболонки ТВЕЛ, яке обумовлене зниженням міцності меж зерен внаслідок утворення та зростання гелієвих бульбашок та виділень інших трансмутантів.

Розглянемо ефект прискореної повзучості оболонки ТВЕЛ, який утворюється в процесі опромінення матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Як відомо [142], якщо до матеріалу оболонки ТВЕЛ, додати розтягуючу напругу, яка не перевищує межі текучості матеріалу, то при досить високих температурах матеріал почне деформуватися (подовжуватися), тобто відбувається

ефект пластичної деформації (повзучість) матеріалу.

Конструкційні вузли та деталі ТВЕЛ, сучасних ядерних енергетичних установок перебувають у напруженому стані і зазвичай працюють при підвищених температурах. Тому однією з головних причин зміни геометричних розмірів ТВЕЛ, поряд з набряком, є повзучість, яка значно посилюється під опроміненням [143, 144].

При цьому необхідно зазначити, що для цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ швидкість радіаційної повзучості значно вища, ніж швидкість термічної повзучості.

Аналіз теоретичних моделей [145], які пояснюють радіаційно-прискорену повзучість, показав, що точкові дефекти, що утворюються в процесі опромінення у вигляді кластерів, мікропор і макротріщин, прискорюють процес деформації під напругою.

Останній ефект найчастіше є суттєвіший, саме тому під впливом опромінення швидкість повзучості зростає.

Крім того, більша частина теоретичних моделей радіаційної повзучості так чи інакше включають процеси переповзання дислокацій в результаті поглинання ними точкових дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин [146].

У полі зовнішньої напруги з'являється додаткова взаємодія дислокації з точковими дефектами, яка зумовлена різницею пружних констант матриці і точкових дефектів, тобто відбувається так званий модульний ефект.

В результаті дислокації, по-різному орієнтовані по відношенню до навантаження, неоднаково поглинаючи точкові дефекти призводять до відмінності їх швидкостей переповзання і в кінцевому рахунку до спрямованої деформації структури матеріалу ТВЕЛ [147 – 153].

1.2.3.4 Аналіз впливу зовнішніх факторів на поверхню оболонки ТВЕЛ

В залежності від особливостей умов експлуатації цирконієвих оболонок ТВЕЛ в реакторі, вплив зовнішніх факторів (теплоносій, водень, кисень та ін.) на їхню працездатність може бути різним і буде визначатися або характеристиками в'язкості

руйнування при короткочасному впливі значних розтягуючих зусиль, наприклад при вивантаженні з реактора, або швидкістю зростання тріщин у виробках в процесі експлуатації в результаті уповільненого гідридного розтріскування під дією залишкових технологічних та експлуатаційних напруг.

В'язкість руйнування (тріщиностійкість) визначається також як схильність цирконієвих матеріалів оболонок ТВЕЛ, до утворення в них тріщин при експлуатації [154].

Виникнення тріщин відбувається як у зовнішній, так і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ. Тріщини є напівеліптичними, їх розвиток відбувається не в одному (осьовому, тангенціальному чи радіальному), а одночасно у 2-х напрямках: осьовому та радіальному чи тангенціальному та радіальному. Крім того, цирконієвий сплав оболонки ТВЕЛ, має анізотропію властивостей у різних напрямках (відмінність властивостей середовища в різних напрямках усередині цього середовища).

Щоб зробити більш повні висновки про зміну структурно-фазового стану, під дією зовнішніх ушкоджуючих і руйнівних факторів (теплоносія, водню, кисню тощо), які призводять до зміни в'язкості руйнування (тріщиностійкості) і розвитку процесу уповільненого гідридного розтріскування оболонки ТВЕЛ, необхідно досліджувати ці процеси у різних напрямках, характерних для даного структурно-фазового стану матеріалу оболонки ТВЕЛ [155].

1.3 Дослідження процесу утворення ушкоджуючих дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ з позицій кластерного підходу

Зміна діаметру и довжина ТВЕЛ в процесі експлуатації обумовлені розмірними змінами оболонок. З початку експлуатації під дією надлишкового тиску теплоносія діаметр ТВЕЛ зменшується.

У міру збільшення вигорання темп зменшення падає до нуля, після чого діаметр оболонки починає збільшуватися. Одночасно зі зменшення діаметра оболонки відбувається збільшення діаметра паливних таблеток – розпухання палива, що призводить до зміни структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, тобто появи у структурі

матеріалу, різного розміру мікропор та макротріщин, які заповнюються молекулами гелію [156].

Таким чином, з огляду на аналіз фізико-хімічних процесів у матеріалі оболонки ТВЕЛ, у процесі експлуатації ЯР типу ВВЕР та впливу всіх вище перерахованих факторів та їх наслідків, у роботі було запропоновано, розглядати процес виникнення первинних та вторинних дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, на основі кластерної теорії .

Розглянемо процес утворення дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ з позицій кластерного підходу [157, 158].

При впливі факторів руйнування на зовнішню і внутрішню поверхню матеріалу оболонки ТВЕЛ, відбувається первинний дефект у вигляді мікропор розміром до 5 мкм (рис. 1.6), які відповідно до кластерної теорії, можна прийняти у вигляді окремого кластера (рис. 1.7).

Подальше збільшення кількості мікропор (кластерів) призводить до утворення макропор до 500 мкм (рис. 1.6) і відповідно до утворення кластерних агрегацій (рис. 1.7).

Далі, при підвищенні температури і тиску між внутрішньою поверхнею оболонки і зовнішньою поверхнею ядерного палива, збільшення концентрації інертних небезпечних газів, відбувається злиття макропор (кластерних агрегацій), що призводить до наскрізних макротріщин (кластер –кластерних структур), а, отже, до появи вторинного дефекту пошкодження оболонки ТВЕЛ [157, 158].

Таким чином, отримана в результаті вторинного дефекту, кластер – кластерна структура (рис. 1.7), являє собою пористу неоднорідну структуру, яка як відомо, має специфічні фрактальні властивості.

Тому, в роботі, запропоновано провести дослідження механізму пошкодження зовнішньої і внутрішньої поверхні структури матеріалу при утворенні дефектів в оболонці ТВЕЛ, для встановлення факту його розгерметизації, на основі обчислювального апарату фрактально-кластерної теорії.

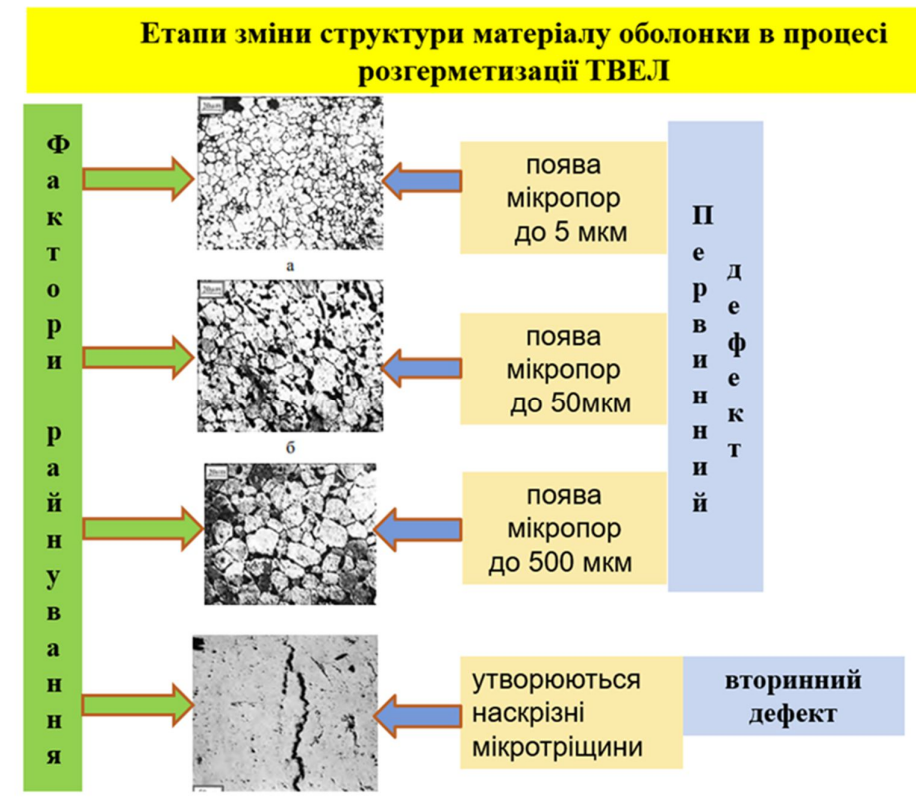


Рис. 1.6. Процес утворення первинних і вторинних дефектів при ушкодженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ

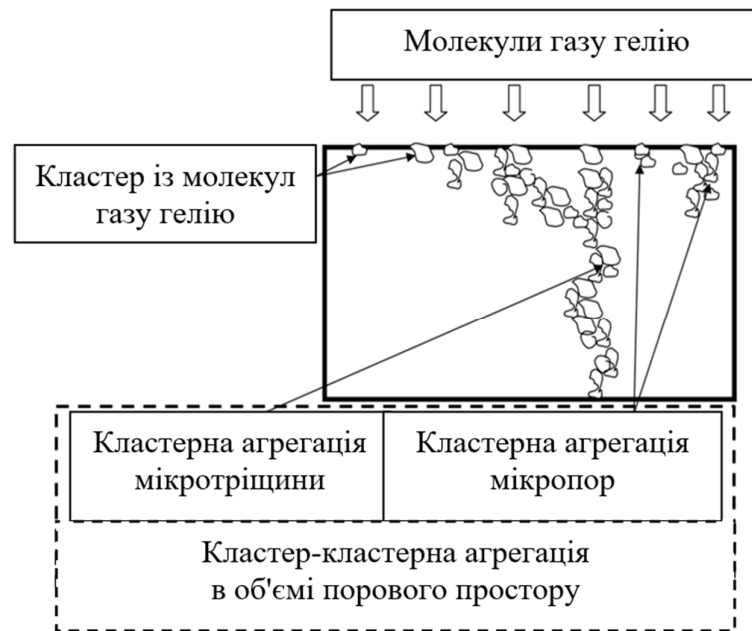


Рис. 1.7. Процес утворення кластер-кластерної агрегації в об'ємі структури матеріалу з пошкодженою поверхнею

1.4 Методологічні підходи щодо виявлення та дослідження дефектів у негерметичних тепловиділяючих елементах

Розглянемо сучасну методологію виявлення та дослідження опромінених негерметичних ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000, яка заснована на послідовному застосуванні кількох неруйнівних методів контролю: оптичного та візуального, ультразвукового, вихрострумового, радіаційного, пневматичного, пухирцевого. За результатами досліджень негерметичних ТВЕЛ, головною причиною розгерметизації ТВЕЛ є утворення наскрізних дефектів у їх оболонках, внаслідок взаємодії зі сторонніми предметами, що знаходяться в теплоносії ядерного реактора. Виявлення негерметичних ТВЕЛ і дефектів у них може здійснюватися за одинадцятьма різними сценаріями, які відрізняються один від одного як за тривалістю, так і за трудомісткістю їх реалізації [159].

Пошук негерметичних ТВЕЛ здійснюється в ході комплексних матеріалознавчих досліджень і на стендах інспекції тепловиділяючих збірок на АЕС, і в захисних камерах ядерних дослідницьких центрів [160]. При цьому використовується комбінація неруйнівних і руйнівних методів контролю та дослідження опроміненого ядерного палива. Неруйнівні методи, дають первинну і в багатьох випадках, достатню інформацію про наявність у ТВЕЛ дефектів, їх параметри та характеристики [161].

Розглянемо різновиди дефектів оболонок ТВЕЛ. Найбільш ймовірні причини виникнення в оболонках ТВЕЛ ВВЕР-1000 дефектів, розвиток яких може призвести до розгерметизації ТВЕЛ, відомі та добре вивчені [162 – 165].

До них відносяться: гідрування оболонки ТВЕЛ через наявність вологи в паливі (порушення технології виготовлення ТВЕЛ); корозія оболонки ТВЕЛ; взаємодія оболонки з ДР ТВЗ (фретинг-корозія); взаємодія оболонки із сторонніми предметами, які перебувають у теплоносії реактора (debris-ушкодження), а також з таблетками ядерного палива.

Результати досліджень ТВЕЛ показали [162 – 165], що найчастіше зустрічаються дефекти, що утворюються в результаті взаємодії оболонки зі

сторонніми предметами в теплоносії реактора, що є основною причиною розгерметизації ТВЕЛ.

Набагато рідше зустрічаються дефекти оболонки в результаті її взаємодії з ДР, а також пов'язані з порушенням технології виготовлення ТВЕЛ. При цьому, за статистикою, у 20% випадків причини розгерметизації оболонки ТВЕЛ невідомі. Сторонні предмети, що рухаються разом із теплоносієм через ТВЗ, як правило, застрягають в елементах збирання. На (рис. 1.8) а в якості прикладу показано фрагмент ТВЗ, в якому між оболонкою ТВЕЛ і ДР застряг сторонній предмет – стружка.

Через пульсації тиску теплоносія, сторонні предмети, що застрягли, починають вібрувати, при цьому відбувається стирання оболонки ТВЕЛа в місці її контакту з предметом.

На (рис. 1.8 б), чітко видно дефект в оболонці після видалення стружки, але на (рис. 1.8 в), представлений приклад поперечного шліфу ТВЕЛ, з наскрізним дефектом оболонки.

При розгерметизації оболонки ТВЕЛ, можливе виникнення в оболонці нових дефектів, які можуть суттєво впливати на її цілісність та бути причиною її руйнування. Такі дефекти називаються вторинними, а дефект, що призвів до розгерметизації оболонки, є первинним [166].

Вода через первинний дефект надходить у зазор між паливом і оболонкою ТВЕЛ, в результаті чого відбувається їх локальне окислення в районі розташування дефекту.

Водень, який при цьому утворився, разом з парою переміщається по зазору між паливом і оболонкою у верхню частину ТВЕЛ, де поглинається цирконієвою оболонкою. При цьому, в матеріалі оболонки ТВЕЛ, утворюються скупчення гідридів цирконію ZrH_2 , які призводять до крихкнення матеріалу оболонки, появи вторинних дефектів і часто до руйнування ТВЕЛ, під час досліджень та транспортно-технологічних операцій [167 – 169].

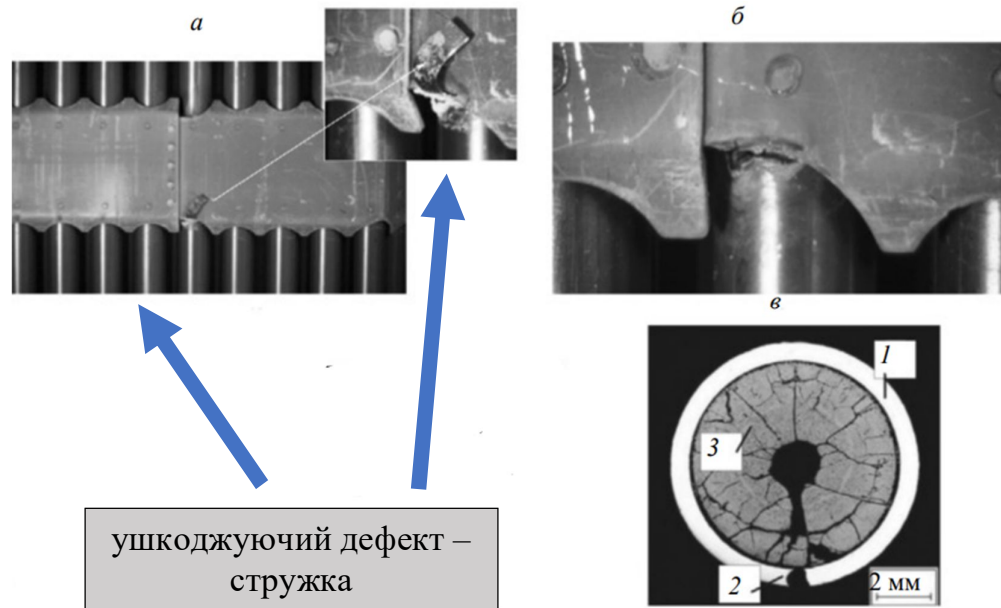


Рис. 1.8. Приклад утворення debris-дефекту: а – сторонній предмет під ДР; б – вид після вилучення стороннього предмета; в – поперечний розріз ТВЕЛ в області наскрізного дефекту: 1 – оболонка ТВЕЛ; 2 – наскрізний дефект в оболонці ТВЕЛ; 3 – таблетка палива UO_2

На (рис. 1.9) наведено приклади утворення вторинних дефектів у негерметичних ТВЕЛ: руйнування негерметичного ТВЕЛ в районі газозбірника через крихтування оболонки (рис. 1.9 а).

Показано, скупчення гідридів у місцях з підвищеною механічною напругою в оболонці – у місці контакту пружинного фіксатора з оболонкою (рис. 1.9 б), при цьому гідриди виходять на зовнішню поверхню оболонки (рис. 1.9 в) поперечного шліфу фрагмента оболонки.

Гідрид цирконію має меншу щільність, ніж цирконієві сплави оболонок ТВЕЛ, тому утворення скупчення гідридів призводить до розпухання оболонки в цьому місці [170, 171].

Таким чином, негерметичним є ТВЕЛ, з дефектом або дефектами, через які продукти поділу ядерного палива можуть надходити в теплоносій реактора.

1.5 Аналіз існуючих моделей ушкодженості та методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000

1.5.1 Аналіз існуючих моделей для контролю пошкодження та руйнування оболонки тепловиділяючого елемента

У роботі [172, 173], розглянуто моделі деформування оболонки ТВЕЛ в умовах реактивнісних аварій. Для даного типу аварій використовуються дві моделі деформування оболонки: осесиметрична модель і неосесиметрична модель, яка враховує азимутальну нерівномірність температури оболонки. Для розрахунку збільшення пластичної деформації на кожному часовому кроці використовується багатопараметрична залежність для визначення напруги течії матеріалу оболонки. Подані в роботах [174] верифікаційні розрахунки показують, що аналітичні залежності в розглянутих моделях, застосовні як при швидкому деформуванні в умовах першої стадії аварії з втратою теплоносія, так і під час аварії зі зростанням реактивності (верифікація за даними імпульсних експериментів на ядерном реакторі), так і при повзучості в умовах другої стадії аварії із втратою теплоносія. Запропонована модель не суперечить отриманим раніше залежностям напруги перебігу цирконієвих сплавів від параметрів та умов деформування, і, більш того, є їх узагальненням, має ширші межі застосування, і може використовуватися при температурах деформування від 293 К до 1473 К та вище, швидкостях зміни температури до 1000 К/с та швидкостях деформації до $2 \dots 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

У роботі [175] проведено опис моделей взаємодії палива та оболонки ТВЕЛ для розрахунку механічної взаємодії палива тепловиділяючого елемента з його оболонкою в ядерному реакторі на швидких нейтронах. Наведено результати тестових розрахунків механічних напруг та деформацій в оболонці ТВЕЛ для різної геометрії розв'язуваної задачі. Взаємодія фрагментованої паливної таблетки з оболонкою, характерна для різких підйомів потужності тепловиділення, може призводити до виникнення концентраторів механічної напруги в оболонці ТВЕЛ, змінюючи її форму та об'єм.

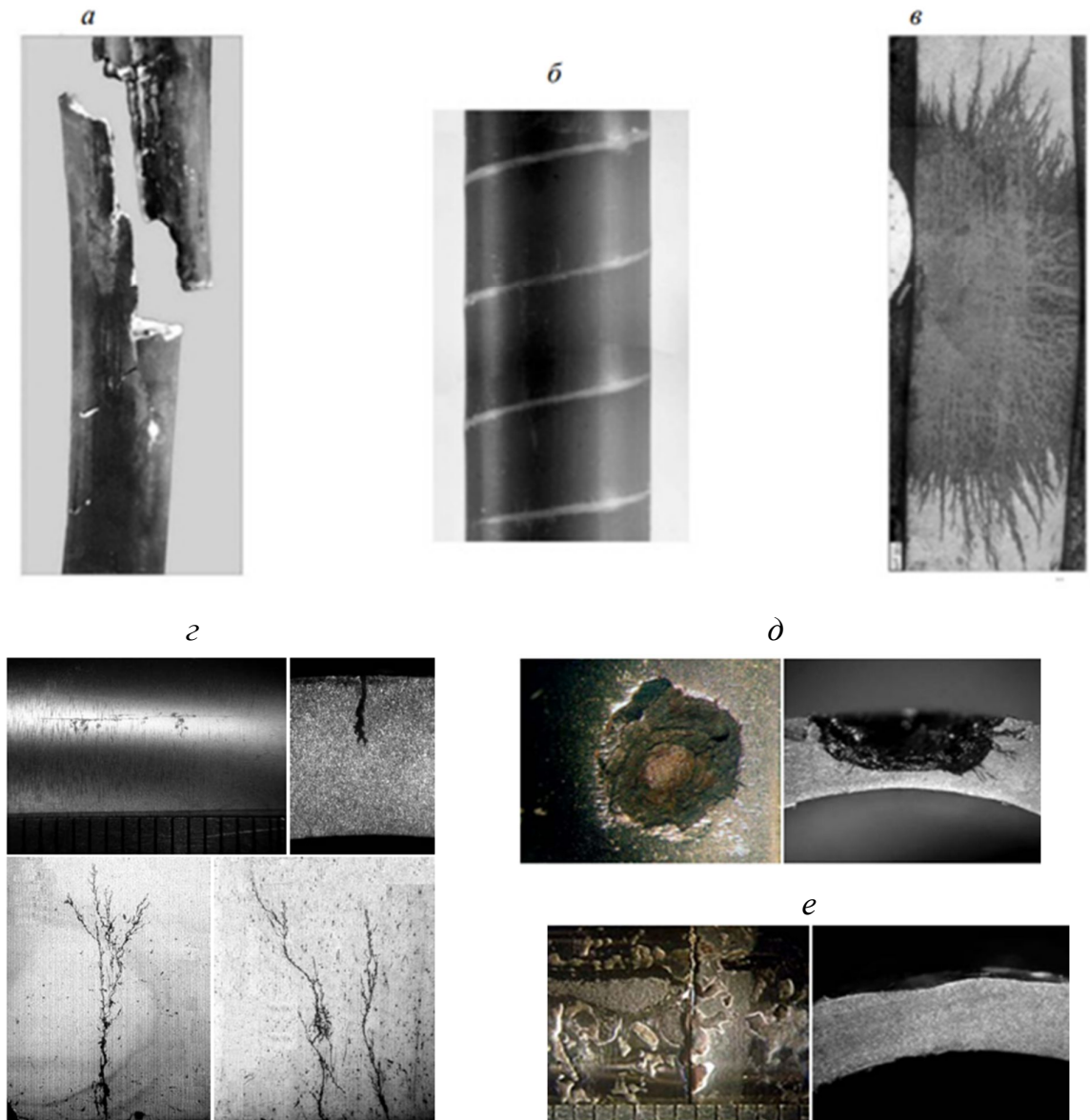


Рис. 1.9. Побічні uszkodження: *a* – руйнування оболонки; *б* – сліди від пружини в газозбірнику; *в* – гідриди в оболонці у місці контакту з пружиною; *г* – корозійне розтріскування під напругою; *д* – пітингова корозія; *е* – плями корозії на поверхні

У роботі [176] розглянуто модель механічної поведінки оболонок ТВЕЛ, яка описує деформацію багатошарової структури з урахуванням залежності фізико-хімічних властивостей оболонки від температури, концентрації кисню, швидкості деформації та ін. У роботі розроблено програмний модуль, призначений для опису плавлення матеріалів (аналіз зміни геометрії). До недоліків моделі відноситься те, що

моделюються лише окремі фізичні явища, що відбуваються на зовнішній поверхні оболонки ТВЕЛ, що не дає уявлення про зміну властивостей та фазового стану структури матеріалу оболонки.

В роботах [177, 178], досліджується застосування вбудованої моделі деформації оболонки ТВЕЛ розрахункового коду RELAP5/MOD 3.2 для палива ВВЕР-1000 з оболонками з цирконієвого сплаву (Zr+1%Nb). Застосовність моделі перевірена для ступеня блокування гарячого каналу після розпухання та розриву оболонки ТВЕЛ при нагріванні в інтервалах температур від 600 до 1200 °C та перепадів тиску від 1 до 12 МПа. Показано, що дані вбудованої моделі можуть бути використані в оцінці руйнування оболонки ТВЕЛ ВВЕР-1000 із цирконієвого сплаву (Zr+1%Nb) тільки в певній обмеженій області параметрів. Проведено оцінку впливу параметрів моделі на максимальну температуру оболонки при максимальній проектній аварії.

У роботі [179], показано, що локальні геометричні порушення в ТЯП, викликані виробничими дефектами, які в деяких випадках, можуть призвести до поверхневої напруги оболонки, і викликати її руйнування. Запропоновано модель для процесу глобальної термомеханічної поведінки паливних стрижнів, включаючи еволюцію теплових та механічних властивостей палива при розподілі, утворенні та виділенні газу розподілу. У моделі враховані місцеві дефекти, які можуть бути змодельовані шляхом безпосереднього включення їх до тривимірної моделі оболонки ТВЕЛ. Це дозволяє використовувати повний набір фізичних параметрів, що використовуються в аналізі характеристик палива, який необхідно включити для обчислення локального дефекту. Результати моделювання можуть бути використані з відповідним критерієм відмови, щоб визначити підвищений ризик витoku, через розтріскування поверхні оболонки.

У роботі [180], розглянуто математичну модель, яка дозволяє визначити розрахункову активність контрольних радіонуклідів у кожному реакторному блоці, у будь-який час після порушення герметичності ТВЕЛ. На цій моделі, для систем контролю герметичності оболонки (КГО), було запропоновано методи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ, за активністю газу газових обсягів ЯР.

Аналіз наукових публікацій [172 – 180] показав, що процеси моделювання ушкодженості оболонки, що проводилося з обмеженнями та припущеннями, щодо геометричних параметрів ТВЕЛ, суттєво впливають на точність розрахунків у відомих моделях. Отже, даний підхід вносить суттєві похибки в розрахунках критеріїв розгерметизації ТВЕЛ і не дає можливості застосовувати у повній мірі аналітичні класичні вирази для моделювання процесів пошкодження і руйнування оболонки ТВЕЛ.

Тому, удосконалення та створення моделей для методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ реакторів типу ВВЕР, з урахуванням структурно-фазових змін у всьому об'ємі матеріалу оболонки та прирощень геометричних параметрів ТВЕЛ, для післяреакторних досліджень є актуальною проблемою.

Відомо [60 – 76], що 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 визначення та розрахунку реальних геометричних параметрів ТВЕЛ, запропоновано використовувати обчислювальний апарат фрактальної геометрії [181,182].

Таким чином, проблема контролю розмірних змін геометричних параметрів ТВЕЛ реактора типу ВВЕР вимагає постійної уваги і вивчення, оскільки він може виявитися одним з вирішальних факторів, що призводить до руйнувань оболонки ТВЕЛ.

1.5.2 Аналіз існуючих неруйнівних методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР-1000

Процес і способи виявлення негерметичних ТВЕЛ та дефектів у їх оболонках є складовою частиною досліджень ТВЗ та ТВЕЛ у захисних камерах та на стендах інспекції на АЕС [183].

Основними неруйнівними методами виявлення негерметичних ТВЕЛ та дефектів, що призводять до їх розгерметизації, є [184 –194]:

- візуальний огляд та оптичні методи контролю;
- ультразвуковий метод виявлення води під оболонкою негерметичного ТВЕЛ;
- вихрострумова дефектоскопія оболонки ТВЕЛ;
- радіаційний метод контролю за кількістю газових продуктів поділу (ГПП) ядерного палива під оболонкою ТВЕЛ;
- пневматичний пухирцевий метод.

Під час розгерметизації ТВЕЛ, при експлуатації в ЯР, фіксується підвищення рівня радіоактивності теплоносія, в який з негерметичного ТВЕЛ, через дефект в оболонці, надходять продукти поділу ядерного палива. При цьому визначити, в якій із 163 ТВЗ (кількість ТВЗ в АЗ реактора ВВЕР-1000) з'явилися негерметичні ТВЕЛ, неможливо [195, 196].

Негерметичну ТВЗ (в якій є негерметичні ТВЕЛ), визначають в процесі перевантаження ТВЗ ЯР, за допомогою радіаційних методів контролю, реєстрації виходу радіоактивних продуктів поділу з кожної ТВЗ окремо, в спеціальний замкнутий контрольований об'єм [197].

Таким чином, перед початком досліджень, відомий стан ТВЗ: герметичний або негерметичний. Якщо ТВЗ негерметична, то в процесі досліджень необхідно виявити та дослідити негерметичні ТВЕЛ. На (рис. 1.10) наведено алгоритм пошуку негерметичних ТВЕЛ та дефектів в них. Будь-які дослідження опромінених ТВЕЛ ТВЗ, починаються з огляду, який проводиться або за допомогою радіаційно стійких телекамер і перископічних систем, або оператором через оглядове вікно захисної камери. Найчастіше, при оглядах вдається виявити негерметичні ТВЕЛ, якщо вони знаходяться у перших двох зовнішніх рядах ТВЕЛ у ТВЗ. Виявлення негерметичних ТВЕЛ у зовнішніх рядах, означає відсутність негерметичних ТВЕЛ всередині ТВЗ. Тому, незалежно від того, були виявлені під час огляду негерметичні ТВЕЛ чи ні, пошук негерметичних ТВЕЛ триває шляхом інспекції всіх 312 ТВЕЛ у ТВЗ [198].

У роботі [199] показано, що якщо вигорання ТВЕЛ у ТВЗ не перевищує $V_{\max} = 45 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кг U}$, то для виявлення негерметичних ТВЕЛ, можна використовувати ультразвуковий метод контролю герметичності оболонки, який заснований на реєстрації води всередині ТВЕЛ, яка потрапила туди після його розгерметизації.

Контроль ТВЕЛ проводиться після демонтажу з ТВЗ головки, коли забезпечується доступ до всіх верхніх заглушок ТВЕЛ. Ультразвуковий датчик встановлюється на торець верхньої заглушки ТВЕЛ (рис. 1.10 а) і з його допомогою в оболонці, збуджуються ультразвукові хвилі, які поширюються по оболонці до нижньої заглушки, відбиваються і після проходження оболонкою у зворотному напрямку реєструються цим датчиком. Якщо ТВЕЛ герметичний, то на осцилограмі спостерігається прийнятний корисний сигнал (рис. 1.10 б). За наявності води під оболонкою відбувається додаткове, порівняно з герметичним ТВЕЛ, розсіювання енергії хвиль усередину ТВЕЛ та амплітуда корисного сигналу зменшується практично до рівня фону (рис. 1.10 в). Метод показав високу надійність та ефективність при інспекції негерметичних ТВЕЛ ТВЗ.

Виявлені негерметичні ТВЕЛ, витягуються з ТВЗ для подальших досліджень. За допомогою спеціального інструменту ТВЕЛ захоплюється за верхню заглушку і повільно витягується з каркасу ТВЗ. Під час вилучення ТВЕЛ, протягується через вихрострумний датчик прохідного типу і проводиться його вихрострумова дефектоскопія [199].

У післяреакторних дослідженнях опромінених ТВЕЛ добре зарекомендував себе імпульсний метод вихрострумного контролю [200 – 202]. У його основі лежить імпульсне збудження зовнішнього електромагнітного поля у широкому частотному діапазоні, яке, своєю чергою, індукує у матеріалі оболонки ТВЕЛ, вихрові струми різної частоти. Первинним перетворювачем є датчик прохідного типу з трьома котушками індуктивності: двома вимірювальними, включеними за диференціальною схемою, і однією збудливою.

Вимірювальні обмотки реєструють зміни електромагнітного поля вихрових струмів, що наводяться в оболонці ТВЕЛ збуджуючою обмоткою, на яку подається імпульс струму.

Аналіз результатів контролю здійснюється шляхом порівняння параметрів відгуків від штучних дефектів контрольних зразків і сигналів, виявлених при вихрострумному скануванні досліджуваного ТВЕЛ [200 – 202].

Характеристики дефектів оцінюються за А-сканограмами (рис. 1.11 б), а також

за вигинальним вихідним сигналом вихрострумowego датчика (рис. 1.11 в), які використовуються також для побудови годографів, за параметрами яких (форма, амплітуда, кут нахилу) оцінюють дефекти оболонки (рис.1.11 г).

Імпульсний вихрострумний метод дефектоскопії ТВЕЛ дозволяє [203]:

- ідентифікувати наскрізні, зовнішні дефекти оболонки;
- внутрішні дефекти оболонки;
- локальні зміни діаметра оболонки;
- електропровідні магнітні та немагнітні включення;
- неелектропровідні магнітні включення.

Оцінка чутливості методу виконувалася за штучними дефектами.

Мінімальні розміри дефектів, які реєструються, такі [14]:

- зовнішня кільцева ризка (ширина 0,06, глибина 0,06 мм);
- зовнішній глухий отвір (діаметр 0,7, глибина 0,3 мм);
- наскрізний отвір (діаметр 0,7 мм);
- поздовжня зовнішня тріщина (ширина 0,06, довжина 9, глибина 0,09 мм) та

поздовжня внутрішня тріщина (ширина 0,08, довжина 12, глибина 0,15 мм).

В якості прикладу на (рис. 1.12 а), наведено вихрострумну діаграму негерметичного ТВЕЛа, у нижній частині якого було виявлено наскрізний дефект (рис. 1.12 б), у верхній частині оболонки – багато вторинних (не наскрізних) дефектів у вигляді скупчень гідридів цирконію (рис. 1.12 в).

Після вилучення негерметичного ТВЕЛ з каркасу ТВЗ проводився його докладний огляд на установці візуально-оптичної інспекції ТВЕЛ (рис. 1.13).

Тепловиділяючий елемент вертикально переміщали щодо перископа, при цьому оператор враховував результати вихрострумної дефектоскопії і фотографував ділянки оболонки, де були зафіксовані дефекти. Фотографування супроводжувалося відеозйомкою ТВЕЛ.

Установка дозволяє робити 10-кратне збільшення ТВЕЛ. Якщо у всіх виявлених негерметичних ТВЕЛ ідентифіковані дефекти, що призвели до їх розгерметизації, завдання пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в них вважається виконаним. Далі ці ТВЕЛ скеровуються на докладні матеріалознавчі дослідження з використанням

руйнівних методів.

Якщо ж під час огляду і вихрострумової дефектоскопії дефектів в ТВЕЛ не виявлено, необхідно переконатися, що ці ТВЕЛ справді негерметичні. Для цього необхідно зробити проколи в оболонках ТВЕЛ, провести аналіз газу під оболонкою, результати якого дозволяють однозначно, ідентифікувати негерметичні та герметичні ТВЕЛ. Якщо ТВЕЛ визнається герметичним, це означає, що при проведенні ультразвукового КГО була перебраковка і даний ТВЕЛ насправді герметичний.

У разі підтвердження негерметичності ТВЕЛ, виявлення наскрізних дефектів в оболонці продовжується за допомогою так званого «бульбашкового» методу, який полягає в наступному. Через отвір в оболонці, виконаний в результаті її проколу, в ТВЕЛ під тиском закачується газ (гелій, азот або повітря). Потім ТВЕЛ поміщають у прозору посудину з водою і спостерігають вихід бульбашок газу через наскрізні дефекти, визначаючи тим самим їх місцезнаходження.

На цьому процес виявлення негерметичних ТВЕЛ та дефектів закінчується і ТВЕЛ передається далі, на докладні матеріалознавчі дослідження з використанням руйнівних методів (мікроскопії, механічних випробувань тощо). Якщо в результаті ультразвукового КГО негерметичні ТВЕЛ не виявлені, то приступають до повної розборки ТВЗ, з оглядом і вихрострумовою дефектоскопією всіх ТВЕЛ. До повного розбирання ТВЗ, приступають також у тому випадку, коли вигорання ТВЕЛ у ТВЗ перевищує граничне значення і тому не можна використовувати ультразвуковий метод КГО. При виявленні за допомогою огляду та вихрострумової дефектоскопії наскрізних дефектів в оболонці ТВЕЛ, ці ТВЕЛ ідентифікуються як негерметичні. На цьому етапі завдання пошуку негерметичних ТВЕЛ і їх дефектів, вважається виконаним. Якщо за результатами огляду та вихрострумової дефектоскопії негерметичні ТВЕЛ не виявлені, то їх пошук продовжується за допомогою гамма-спектрометричного методу, заснованого на вимірюванні активності ^{85}Kr у газозбірнику ТВЕЛ [27]. При експлуатації ТВЕЛ в ядерному реакторі типу ВВЕР-1000, в результаті поділу ядер ^{235}U , утворюються газові продукти поділу, такі як Хе і Кр, частина яких виходить з матриці UO_2 у внутрішньотвельну атмосферу. Після вилучення негерметичної ТВЗ з ядерного реактору тиск газу всередині

негерметичного ТВЕЛ, порівнюється з тиском навколишнього середовища ТВЕЛ і буде приблизно в 20...30 разів менше, ніж тиск у герметичних ТВЕЛ. Таким чином, реєстрація кількості газових продуктів поділу ядерного палива в газозбірнику дозволяє виявити негерметичні ТВЕЛ.

Для цього реєструють гамма-випромінювання радіоізоотопу ^{85}Kr , який в результаті спонтанного розпаду ядер, випромінює гамма-кванти з енергією ~ 514 кеВ, до того ж має досить великий період напіврозпаду $\sim 10,8$ року, і, отже, контролювати герметичність по цьому радіоізоотопу, можна протягом досить тривалого часу (до 10 років і більше) після вилучення ТВЗ з ядерного реактора типу ВВЕР-1000. Вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання від газозбірника ТВЕЛ проводиться за допомогою установки, виконаної на базі захисного контейнера, який встановлюється над захисною камерою з досліджуваними ТВЕЛ (рис. 1.14) [27].

Досліджуваний ТВЕЛ за допомогою підйомного пристрою через отвір у стелі захисної камери втягується в контейнер таким чином, щоб газозбірник знаходився навпроти горизонтального коліматора, виконаного в стінці контейнера.

На звороті коліматора знаходиться германієвий детектор з гамма-спектрометром, за допомогою якого реєструється гамма-спектр випромінювання від газозбірника ТВЕЛ. На (рис. 1.15), в якості прикладу наведено гамма-спектри для герметичного та негерметичного ТВЕЛ. У герметичного ТВЕЛ, на спектрі чітко спостерігається пік у діапазоні енергії 510...514 кеВ, що відповідає гамма-випромінюванню ^{85}Kr , тоді як для негерметичного ТВЕЛ цей пік відсутній [27].

Це говорить про відсутність або невелику кількість ^{85}Kr під оболонкою ТВЕЛ і, отже, вказує на його негерметичність. Якщо в результаті контролю радіометричним методом негерметичних ТВЕЛ не виявлено, а також з урахуванням раніше виконаного огляду та вихрострумової дефектоскопії, ТВЗ визнається герметичною. Виявлені негерметичні ТВЕЛ, відправляють на прокол оболонки. При цьому ще раз переконуються в їх негерметичності, а також готують ТВЕЛ до застосування бульбашкового методу, для виявлення наскрізних дефектів в оболонці.

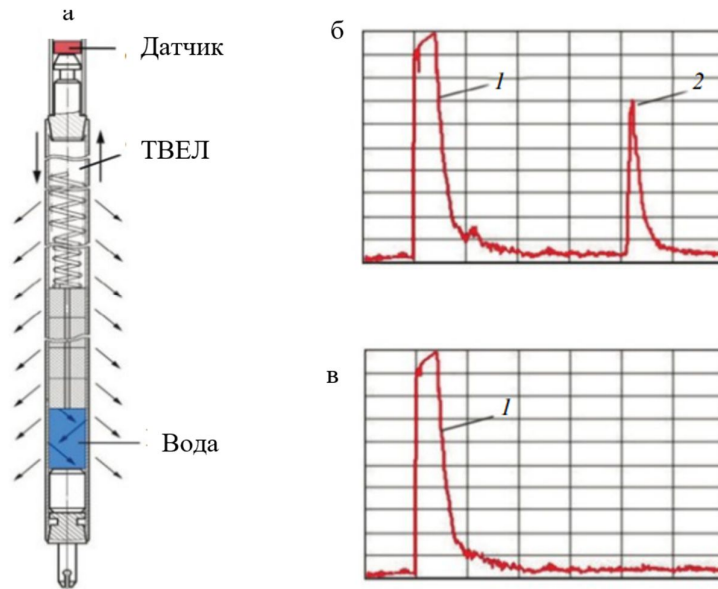


Рис. 1.10. Ультразвуковий метод виявлення негерметичних ТВЕЛів у ТВЗ: а – схематичне зображення датчика та інспектованого ТВЕЛА; б – А-сканограма герметичного ТВЕЛА; в – А-сканограма негерметичного ТВЕЛА; 1 – сигнал збудження датчика; 2 – корисний сигнал.

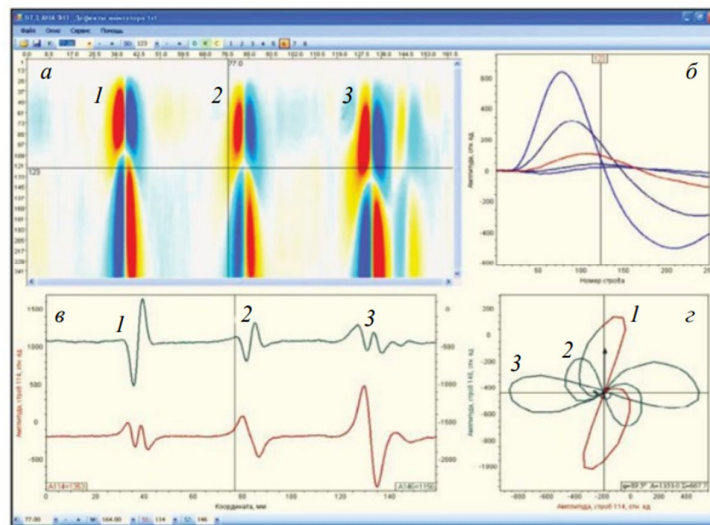


Рис. 1.11. Головне вікно програми з результатами ВТ-контролю фрагмента імітатора із зовнішнім (1), наскрізним (2) та внутрішнім (3) дефектами: а – D-скан; б – А-сканограми в околиці наскрізного дефекту; в – обгинальні сигнали; г – годографи.

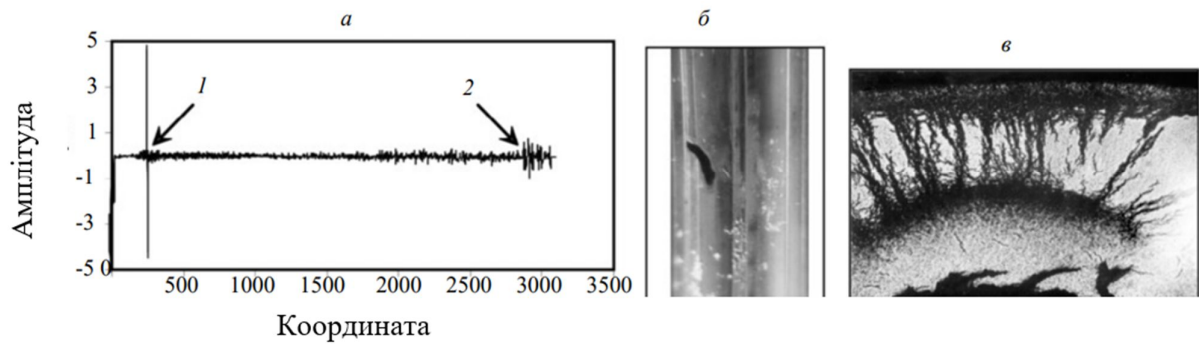


Рис. 1.12. Результати вихрострумової дефектоскопії негерметичного ТВЕЛа: а – огинаюча сигнал; б – зовнішній вигляд наскрізного дефекту; в – мікроструктура оболонки у місці розташування вторинного дефекту; 1 – сигнал від наскрізного дефекту; 2 – сигнал від вторинного дефекту.

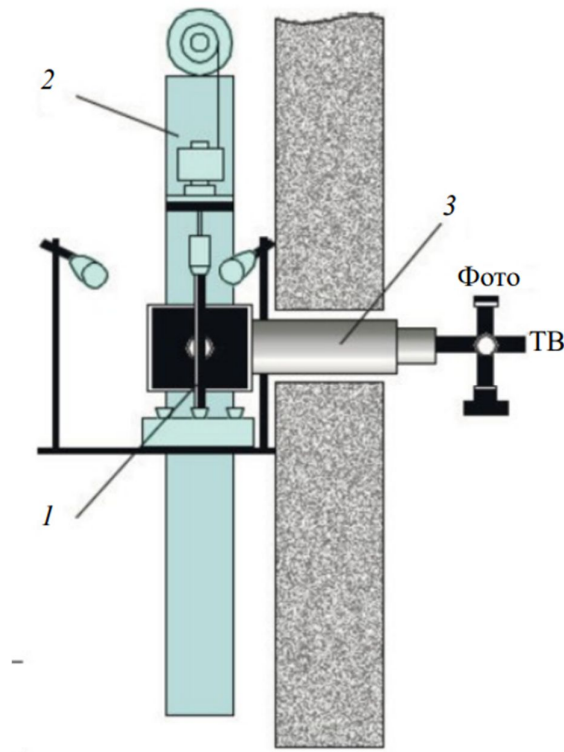


Рис. 1.13. Схема встановлення візуально-оптичної інспекції ТВЕЛ: 1 – ТВЕЛ; 2 – пристрій позиціонування; 3 – перископ.

Після виявлення дефектів в оболонці завдання пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в них вважається виконаним. Таким чином, аналіз методології пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в їх оболонках, які призводять до розгерметизації ТВЕЛ, показує, що пошук негерметичних ТВЕЛ може виконуватися за декількома різними сценаріями, які можна умовно розділити на дві групи. До першої групи (три сценарії), відносяться сценарії контролю, в яких не потрібно виконувати повне спотворення ТВЗ, в той час як в інших восьми сценаріях. До другої групи (вісім сценаріїв) відносяться сценарії контролю, в яких при виявленні негерметичних ТВЕЛ, потрібне розбирання ТВЗ із вилученням і контролем усіх ТВЕЛ. Розбирання всієї ТВЗ не потрібно, якщо в результаті використання ультразвукового КГО виявлено негерметичні ТВЕЛ. При виявленні в негерметичних ТВЕЛ в результаті огляду та вихрострумової дефектоскопії наскрізних дефектів у їх оболонках, поставлене завдання вирішено. Цей сценарій вимагає мінімум часу та ресурсів, порівняно з іншими сценаріями пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в їх оболонках. Найбільш складним з технічної точки зору та вимагає максимальних витрат часу і ресурсів, є сценарій, в якому проводять розбирання ТВЗ, а негерметичні ТВЕЛ виявляють тільки після використання радіаційного методу контролю активності ^{85}Kr в газозбірниках всіх ТВЕЛ, так як їх огляд та вихрострумний дефектоскоп не дозволили виявити в оболонках наскрізних дефектів і, отже, негерметичних ТВЕЛ.

Для реєстрації наскрізних дефектів у виявлених негерметичних ТВЕЛ їх оболонки проколюють, одночасно аналізують газ усередині ТВЕЛ і бульбашковим методом визначають координати наскрізних дефектів. Таким чином, аналіз проведених сценаріїв показав, що з точки зору витрат часу та ресурсів для виявлення негерметичних ТВЕЛ, перший сценарій кращий, тому що на його реалізацію потрібно кілька днів, в той же час на реалізацію другого – в десятки разів більше, кілька місяців.

За кількістю операцій, що здійснюються з ТВЕЛ ТВЗ, ці два сценарії також дуже відрізняються один від одного. Якщо в першому, для пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в них, потрібно кілька десятків операцій з ТВЗ і ТВЕЛ, то для другого з повним розбиранням ТВЗ, кількість операцій обчислюється тисячами.

Таким чином, очевидно, що для покращення технології пошуку та виявлення

негерметичних ТВЕЛ та дефектів у їх оболонках, необхідно удосконалювати існуючі та розробляти нові неруйнівні методи контролю герметичності оболонки ТВЕЛ опромінених ТВЗ. Це в першу чергу стосується методів виявлення негерметичних ТВЕЛ у складі ТВЗ без її розбирання і методів вихрострумової дефектоскопії в частині підвищення чутливості до дефектів оболонки ТВЕЛ.

Необхідно також відзначити, що недоліком описаної методології пошуку негерметичних ТВЕЛ і дефектів в їх оболонках, заснованої на послідовному застосуванні оптичних, ультразвукових, вихрострумових, радіаційних і пневматичних пухирцевих неруйнівних методів контролю, є необхідність розбирання ТВЗ, якщо ультразвуковий метод пошуку застосовується через високі вигорання палива, або якщо після його використання негерметичні ТВЕЛ, виявлені не були.

Обмеження, пов'язані із застосуванням ультразвукового методу, особливо сильно впливають на пошук негерметичних ТВЕЛ не в захисних камерах, а під водою, в басейні витримки АЕС, за допомогою спеціальних стендів інспекції та ремонту ТВЗ, тому що в умовах АЕС практично неможливо реалізувати повне розбирання ТВЗ. Тому в даний час найбільш актуальним завданням щодо вдосконалення методичної та технічної бази для пошуку негерметичних ТВЕЛ є розробка методу, який би дозволяв, незалежно від вигорання, виявляти негерметичні ТВЕЛ у складі ТВЗ ядерного реактора типу ВВЕР-1000, без вилучення ТВЕЛ з ТВЗ.

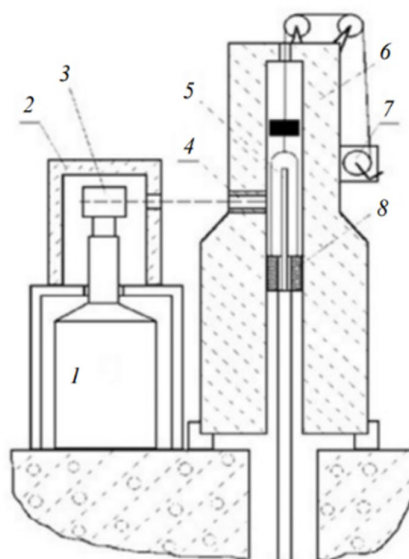


Рис. 1.14. Схема установки для вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання ^{85}Kr у газозбірнику ТВЕЛ: 1 – посуд Дьюара; 2 – свинцевий захист детектора; 3 – детектор; 4 – коліматор; 5 – ТВЕЛ; 6 – захисний контейнер; 7 – підйомний пристрій; 8 – пенал для ТВЕЛ

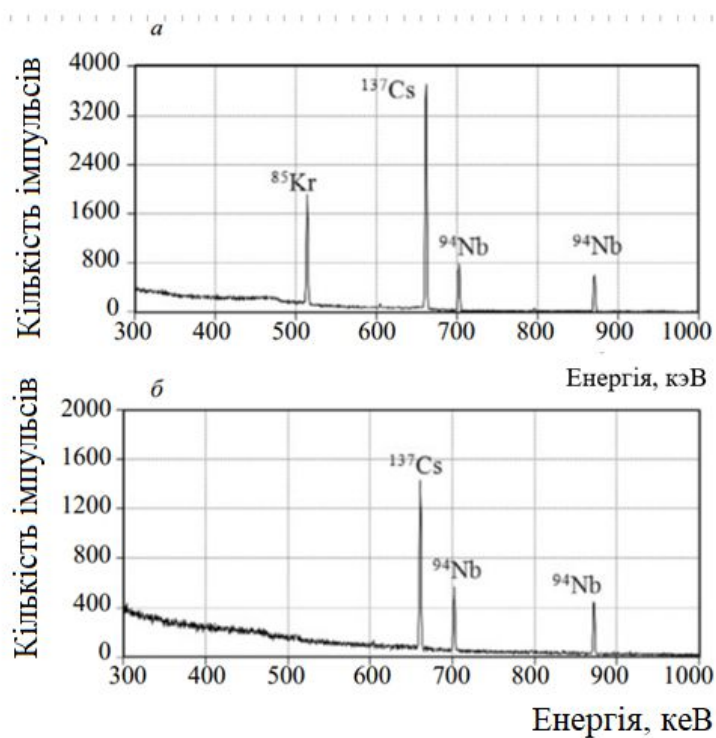


Рис. 1.15. Гамма-спектри газової порожнини герметичного (а) та негерметичного (б) ТВЕЛ.

1.6 Аналіз сучасних систем контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента

1.6.1 Аналіз вимог до сучасних систем контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента

При підвищенні потужності реактора одним з основних є завдання контролю стану оболонок тепловиділяючих елементів відпрацьованих тепловиділяючих збірок. Таким чином, контроль герметичності оболонок відпрацьованих ТВЗ, що занурюються, фактично є першим етапом організації управління станом ядерного палива. На жаль, існуючі системи КГО для реакторів серії ВВЕР мають низьку ефективність і вимагають суттєвих витрат часу для проведення контролю [204 – 214].

На сьогоднішній день, при підвищенні потужності ядерного реактора АЕС, одним з основних завдань безпеки, є забезпечення контролю стану оболонок ТВЕЛ відпрацьованих тепловиділяючих збірок. Таким чином, контроль герметичності оболонок занурюваних відпрацьованих ТВЕЛ ТВЗ, фактично є першим етапом організації управління станом ядерного палива.

Система КГО ТВЕЛ займає найважливіше місце в системі радіаційної безпеки АЕС. Система КГО дозволяє, своєчасно виявляти розгерметизацію ТВЕЛ, що почалася, і відстежувати розвиток дефекту, запобігаючи, тим самим, важким аваріям і катастрофам. На жаль, існуючі системи КГО ядерного реактору АЕС серії ВВЕР-1000, мають низьку ефективність і вимагають істотних витрат часу для проведення контролю.

В даний час на всіх діючих АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 експлуатується штатна система КГО ТВЕЛ, розроблена ще наприкінці 60-х рр., яка морально та фізично застаріла [206].

У зв'язку з цим видається актуальним розробити нові методи контролю для систем КГО, які здатні визначати місце розташування, тип та розміри дефекту пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Аналіз основних причин і недоліків, існуючих СКГО ТВЕЛ показав [204 – 214], що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік запізнілих нейтронів, питома активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ.

Взаємозв'язок детекторів і датчиків контролю систем КГО ТВЕЛ з параметрами пошкодженої оболонки ТВЕЛ, ґрунтується на розрахункових моделях, які не дають достовірної оцінки розміру пошкоджених дефектів, так вихід радіонуклідів у теплоносії, залежить від кількості, місця розташування та розміру наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ. Таким чином, система КГО ТВЕЛ, обмежена виміром активності реперних нуклідів у технологічних середовищах і не дозволяє, кількісно характеризувати ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ [204 – 214].

У зв'язку з цим, є актуальним, розробити нові методи контролю для систем КГО ТВЕЛ, які здатні визначати місце розташування, тип та розміри дефекту пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ. Тому, постає питання, щодо удосконалення систем КГО ТВЕЛ, на основі фрактального методу контролю та виявлення дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Проведемо аналіз останніх досліджень та публікацій.

У роботі [215], розглянуто систему КГО ТВЕЛ, щодо газу, яка функціонує при роботі ядерних реакторів на швидких нейтронах на повній потужності та забезпечує:

- контроль сумарної активності захисного газу реактора з газової подушки;
- визначення ізотопного складу гамма-активних нуклідів у захисному газі;
- безперервний оперативний контроль появи та розвитку дефектів оболонки ТВЕЛ типу “газова нещільність”;

– передачу в автоматизовану систему радіаційного контролю (АСРК) та АСУ ТП енергоблоку АЕС, сигналів про перевищення контрольного та гранично допустимого рівнів негерметичності оболонок ТВЕЛ по газу.

На відміну від блоків детектування, що використовуються на АЕС в даний час, розроблена система КГО ТВЕЛ, дозволяє оперативно вимірювати об'ємну

сумарну активність реакторного газу у всьому діапазоні очікуваних значень, а також ефективно виявляти газову розгерметизацію на ранній стадії за рахунком поділу складової активності, яка викликана радіонуклідами [216].

У роботі [217], розглянуто проблеми контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, при переході АЕС України на нові види ядерного палива. Аналіз сучасних методик систем КГО ТВЕЛ показав, що їм притаманні такі основні недоліки як, прихильність до ТВЕЛ, лише заздалегідь заданої геометрії, а також відсутність можливості визначення зміни інтервалу між внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ та зовнішньою поверхнею таблетки ядерного палива. У зв'язку з цим, у роботі запропоновано удосконалення методики системи КГО ТВЕЛ, на основі врахування потужності сумарної активності радіонуклідів йоду в першому контурі ЯР АЕС. У той же час, як показує практика, за цією методикою проводиться врахування тільки поверхневого забруднення оболонки, навіть за відсутності негерметичних ТВЕЛ, що різко впливає на якісні та кількісні показники контролю ушкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ.

У роботі [218], дається опис проектованої системи КГО ТВЕЛ ядерного реактора АЕС. Пропонується метод локалізації ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ на працюючому ЯР АЕС, для скорочення часу пошуку дефектної ТВЗ на зупиненому реакторі. Метод заснований на використанні показань детекторів системи КГО ТВЕЛ по запізнілим нейтронам і моделюванні розподілу теплоносія по петлях теплообміну. В основі методу лежить принцип індикації витоку продуктів поділу з пошкоджених оболонок ТВЕЛ в теплоносій. В якості реперних радіонуклідів, обрані попередники запізнілих нейтронів. Осколки поділу – попередники запізнілих нейтронів, виходять в теплоносій у тих випадках, коли оболонка ТВЕЛ пошкоджена і паливо в місці пошкодження контактує з теплоносієм.

Таким чином, вимірювання потоку нейтронів, що випускаються теплоносієм першого контуру в місцях розташування детекторів системи, дозволяє вести безперервний контроль за появою дефектів типу “контакт палива з теплоносієм” та їх розвитком.

У роботі [219] показано, що для виявлення дефектних ТВЗ, що містять

негерметичні ТВЕЛ, на трубопроводах петель охолодження та на експериментальних петлевих каналах на виході з активної зони, встановлюються детектори запізнілих нейтронів (ДЗН), на основі іонізаційних камер поділу. Сигнали ДЗН подаються на вимірювальний пристрій, де виконується формування цифрового сигналу, що відповідає щільності потоку нейтронів від теплоносія (натрію) першого контуру та теплоносія, що циркулює експериментальними каналами. Таким чином, запропонований у роботі підхід до локалізації ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ, на працюючому ЯР, дозволяє суттєво звужити область пошуку на зупиненому ЯР АЕС та скоротити час простою.

У роботах [220 – 222], проведено огляд методів контролю, які застосовують у системах КГО ядерних реакторів АЕС. До них належать методи руйнівного та неруйнівного контролю: капілярні, радіографічні, радіохвильові, маспектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні, вихорострумової дефектоскопії тощо.

Однак даним методам властиві характерні недоліки [223 – 225]:

- прийняті обмеження та припущення, щодо усереднення геометричних характеристик поверхні матеріалу;
- при накопиченні пошкоджень поверхні, враховується вплив зовнішніх ушкоджувальних дефектів;
- в якості основного фізичного процесу накопичення пошкоджень, як правило, розглядається процес повзучості матеріалу, без урахування структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації елементів;
- розрахунок пошкодження оболонки за граничними умовами, проводиться тільки для найнапруженішого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті на поверхні матеріалу, що вносить значні усереднення та похибки у розрахунки.

Таким чином, на сьогоднішній день, недостатньо повно розроблені методи систем КГО для оцінки стану структури матеріалу оболонки з пошкодженою поверхнею, що потребує їх удосконалення [226].

1.6.2 Аналіз видів контролю у сучасних системах контролю герметичності оболонки ТВЕЛ

Проведемо аналіз сучасних систем контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000 [227 – 244].

Розглянемо завдання та вимоги до системи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000. Системи КГО ЯР на АЕС вирішують два основні завдання [245, 246]:

Перше завдання – визначення факту розгерметизації ТВЕЛ і оцінка масштабу дефекту на поверхні оболонки ТВЕЛ. На основі отриманої інформації приймається рішення про можливість або неможливість продовження роботи ядерного реактора АЕС.

Друге завдання – визначення місця розташування дефектних ТВЕЛ і ТВЗ. Як правило, на працюючому реакторі визначають область активної зони, в якій знаходиться дефект. Остаточний вибір дефектної ТВЗ виконується на зупиненому реакторі.

Основним застосуванням системи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ, є контроль стану (герметичності) оболонок ТВЕЛ, як в процесі експлуатації ядерного реактора (оперативна частина), так і на зупиненому реакторі, включаючи процес відмивання відпрацьованих ТВЗ (неоперативна частина).

Система КГО, що забезпечує контроль цілісності базового бар'єру безпеки – оболонки ТВЕЛ, є важливою системою, для безпеки класу ЗН або ЗНУ і входить до складу автоматизованої системи радіаційного контролю АСУ ТП енергоблоку АЕС.

Основною метою і завданням сучасної системи КГО, є підвищення ядерної і радіаційної безпеки експлуатації реакторної установки, зберігання відпрацьованого палива в басейні витримки та сприяння забезпеченню високих експлуатаційних показників енергоблоку АЕС за рахунок [246, 255]:

- контролю герметичності оболонок ТВЕЛ на всіх стадіях розвитку дефектів від газової нещільності до контакту ядерного палива з теплоносієм;
- контролю за вмістом в теплоносії першого контуру продуктів поділу палива;

- контролю за вмістом в газі першого контуру радіонуклідів осколкового і активаційного походження;
- видачі в АСРК і АСУ ТП енергоблоку АЕС сигналів, для подання експлуатаційному персоналу інформації про значення вимірюваних параметрів;
- видачі в АСУ ТП сигналів про перевищення контрольного і гранично допустимого значень негерметичності оболонок ТВЕЛ;
- скорочення часу пошуку дефектних ТВЗ на зупиненому реакторі і запобігання вивантаження недовигорівших ТВЗ, що не містять дефектні ТВЕЛ;
- виявлення відпрацьованих ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ в процесі відмивання і організації їх зберігання, з метою мінімізації забруднення води басейну витримки продуктами поділу палива.

Підвищені експлуатаційні вимоги до систем КГО реакторів на швидких нейтронах обумовлені тим, що нормативні межі пошкодження ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР, істотно більш консервативні (в 4...10 разів) у порівнянні з межами, встановленими для інших типів реакторів.

Сучасні системи КГО, розробляються на основі багаторічного досвіду розробки і експлуатації систем КГО українських і зарубіжних реакторних установок на швидких нейтронах з натрієвим теплоносієм, із застосуванням сучасних спеціалізованих детекторів, блоків детектування, програмно-технічних засобів, сучасного обладнання.

Сучасні системи КГО українських та зарубіжних реакторних установок, включають оперативні та неоперативні системи (підсистеми) КГО, як показано на (рис. 1.16):

На основі комплексного аналізу показань вимірювальних каналів ССКГО, розташованих у блоках детектування (БД) різних секторів активної зони ядерного реактора, на АРМ системи КГО, вирішується завдання виявлення та локалізації (орієнтовне визначення місця розташування) в активній зоні тепловиділяючих збірок, що мають негерметичні ТВЕЛ [246,255].

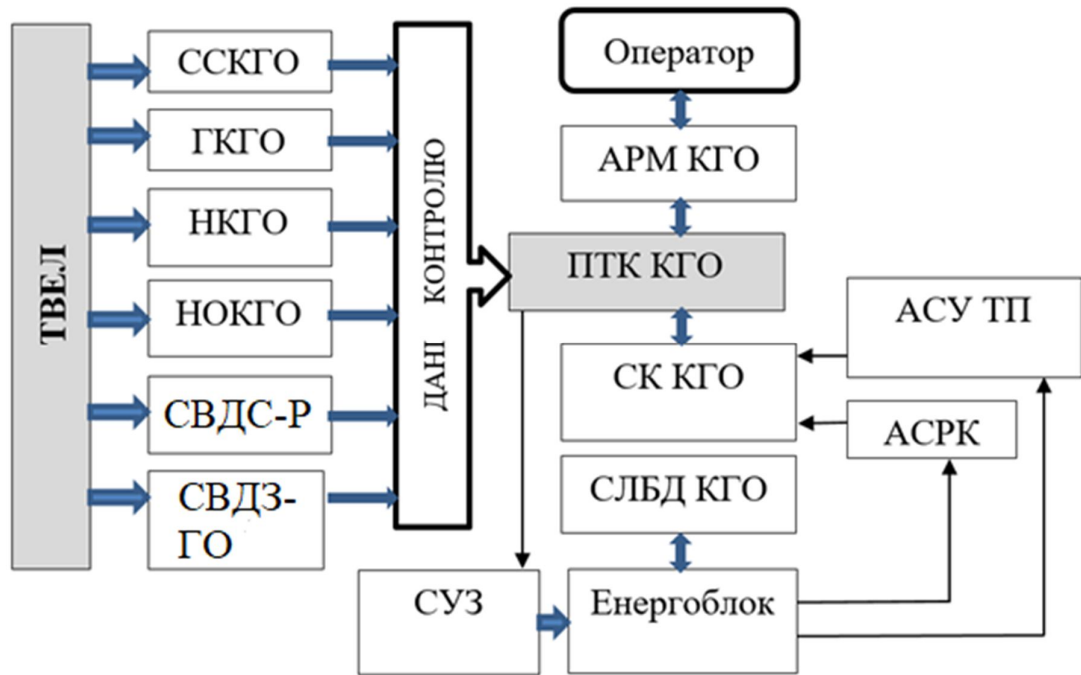


Рис. 1.16. Структурна схема сучасної системи контролю герметичності оболонки ТВЕЛ

Системи КГО швидких реакторів типу ВВЕР-1000, включають оперативні системи (підсистеми) КГО [246,255]:

ССКГО – секторальна система КГО по запізнілих нейтронах в теплоносії першого контуру;

ГКГО – система КГО за активністю газу в газовій порожнині реактора (газова система КГО);

НКГО – система КГО по активності радіонуклідів в теплоносії (натрію) першого контуру (натрієва система КГО).

Системи КГО швидких реакторів типу ВВЕР-1000, включають неоперативні системи (підсистеми) КГО:

СВДС-Р – система виявлення дефектних ТВЗ в активній зоні на зупиненому реакторі (реакторна система, поєднана з перевантажувальною машиною);

СВДЗ-ГО – система виявлення дефектних збірок в гнізді відмивання (позареакторна система);

ПТК КГО – програмно-технічний комплекс КГО;

СК – сервер комунікації з верхнім рівнем автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку АЕС та автоматизованою системою радіаційного контролю;

СЛБД – сервер локальної бази даних систем КГО та параметрів енергоблоку АЕС;

АРМО КГО – інтелектуальне автоматизоване робоче місце оператора-фахівця, що забезпечує комплексний підхід під час вирішення завдання КГО;

СУЗ – система управління та захисту.

Розглянемо функції та завдання для виконання вимог, що пред’являються до оперативних підсистем СКГО [246 – 258].

Секторальна система КГО (ССКГО) по запізнілих нейтронах в теплоносії першого контуру, функціонує при роботі реактора на потужності і повинна забезпечувати наступні функції і завдання:

- безперервний контроль щільності потоку запізнілих нейтронів, від теплоносія першого контуру, що пройшов через різні області активної зони;

- виявлення наявності в активній зоні ТВЗ, що мають ТВЕЛ з дефектом “контакт палива з теплоносієм”;

- видачу в АСРК для подання оператору інформації про значення щільності потоку запізнілих нейтронів, по секторах активної зони і сигналів про перевищення контрольних і гранично допустимих значень щільності потоку запізнілих нейтронів і швидкості її зростання;

- видачу в СУЗ аварійних сигналів при досягненні гранично допустимих значень щільності потоку запізнілих нейтронів, і швидкості її зростання.

Для підсистеми ССКГО, розглянемо застосовність методу КГО ТВЕЛ, заснований на реєстрації запізнілих нейтронів, які випускають продукти поділу – попередники запізнювальних нейтронів, що потрапили в теплоносії через дефект в оболонці ТВЕЛ. Розглянемо і проаналізуємо види дореакторного первинного контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, який відбувається перед завантаженням в ядерний реактор АЕС [246 – 258]:

- контроль з використанням пробного газу;

- метод візуального контролю.

Розглянемо і проаналізуємо сучасні методи КГО, які застосовуються для більшості типів реактора АЕС [246 – 258]:

- метод контролю за активністю продуктів поділу в газовій порожнині реактора;

- метод контролю бета і гамма-активності теплоносія.

- метод контролю за запізними нейтронами (показаний на (рис. 1.17), а схема БД секторної системи КГО по запізним нейтронах ЯР БН-800 представлена на (рис. 1.18));

- метод контролю з використанням пеналів КГО.

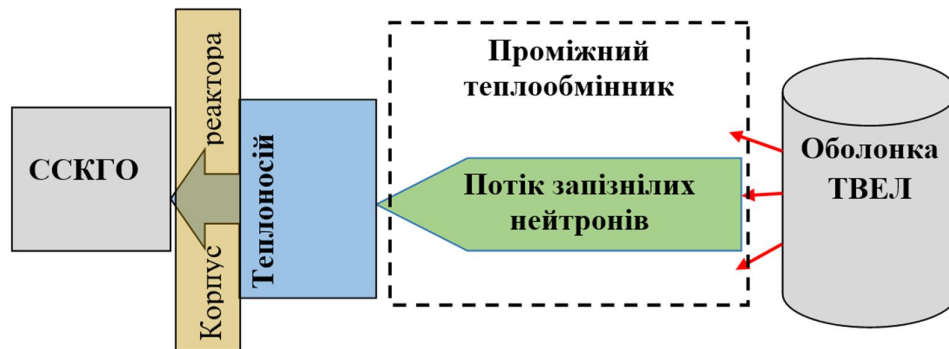


Рис. 1.17. Принцип роботи секторної системи контролю герметичності оболонки



Рис. 1.18. Розташування блоків детектування ССКГО БН-800 і БН-600

- селекторний метод контролю (показаний на (рис. 1.19), а вимірювальна

емність БД оточена декількома сантиметрами свинцевого захисту і поліетиленовим сповільнювачем представлена на (рис. 1.20), а с використанням графіту на (рис. 1.21);

- водно-газовий метод контролю КГО на ВWR;
- вакуумний метод контролю;
- експертна система контролю та супроводу експлуатації палива ВВЕР;
- система пробовідбірною контролю;
- метод співвідношення;
- система КГО по активності газу в газовій порожнині реактора (ГКГО);
- система КГО швидких реакторів;
- неоперативна система КГО – система виявлення дефектних ТВЗ в активній зоні на зупиненому реакторі (СВДЗ-Р);
- система виявлення дефектних збірок в гнізді відмивання (СВДЗ-ГВ).

Застосування сучасних програмно-технічних засобів системи КГО забезпечує можливість реалізації передових систем автоматизованої підтримки експлуатаційного персоналу при проведенні контролю [246 – 255].

Розглянемо основні методи і системи локалізації дефектних ТВЕЛ і ТВЗ [246,255]:

- метод перекомпенсації нейтронного поля (призначений для визначення місця розташування ТВЗ, що містить ТВЕЛ з дефектом оболонки типу прямий контакт палива з теплоносієм);
- метод контролю за співвідношенням активності реперних радіонуклідів;
- система для локалізації дефектних ТВЗ "FINESS" (призначена для контролю цілісності ТВЕЛ шляхом аналізу активності радіоактивних благородних газів в газовій порожнині на працюючому реакторі).

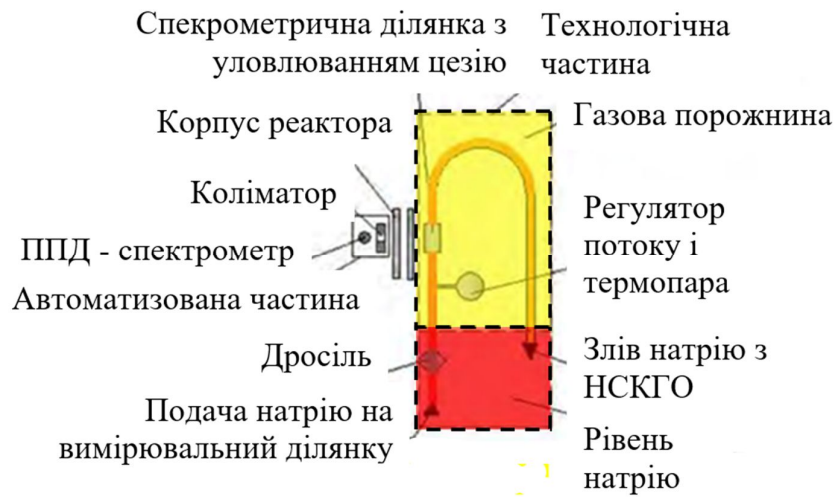


Рис. 1.19. Натрієва система КГО перспективного натрієвого реактора

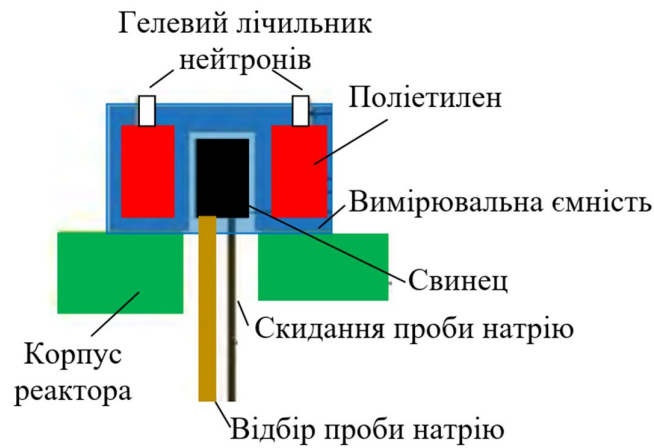


Рис.1.20. Схема системи КГО з поліетиленовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

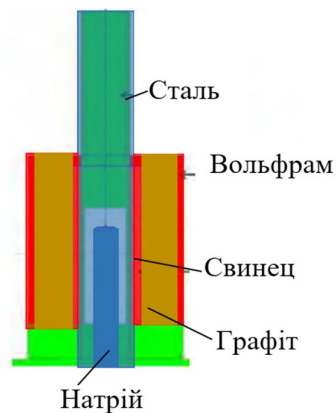


Рис. 1.21. Схема системи КГО з графітовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

1.7 Узагальнення результатів аналізу. Обґрунтування напрямків досліджень

З урахуванням теми роботи було сформовано мету дисертаційного дослідження – розробка методу КГО ТВЕЛ для системи КГО, шляхом моделювання процесів пошкодження оболонки та визначення критерію оцінки ступеня розгерметизації ТВЕЛ, з урахуванням структурно-фазових змін (СФЗ) та фрактальних властивостей структури матеріалу оболонки, на основі застосування теорії фрактальної геометрії. Проведений аналіз факторів та причин, що впливають на пошкодження оболонки ТВЕЛ показав, що необхідно враховувати ушкоджуючі дефекти як на зовнішній так і на внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ, які спричиняють утворення локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин та призводять до СФЗ стану матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Виконано аналіз фізичних процесів, при ушкоджуючих дефектах у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, які викликані зовнішніми та внутрішніми факторами. Аналіз показав їх вплив на наступні геометричні характеристики оболонки ТВЕЛ: різка зміна форми та об'єму оболонки в поперечному перерізі (здуття, розпухання, зм'яття, кручення, бочкоподібність та ін.); ефект подовження оболонки (повзучість та плинність матеріалу); вигини оболонки, тобто перевищення встановлених значень радіусу кривизни та вихідних допусків на овальність оболонки; зменшення (збільшення) товщини оболонки ТВЕЛ.

Показано, що подовження ТВЕЛ також може зростати через утворення множинних локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин у структурі матеріалу оболонки, яка має властивості фрактальності, масштабованості, інваріантності і характеризуються величиною фрактальної розмірності.

Запропоновано новий підхід для вивчення СФЗ у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, викликаних ушкоджуючими дефектами, на основі апарату фрактальної геометрії, який враховує фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ. Запропоновано в системах КГО ТВЕЛ ЯР, застосувати принципово новий метод оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, з урахуванням сучасних

наукових досягнень, на основі використання фрактально – кластерної теорії.

Обґрунтовано, що в якості основи, пропонованого методу КГО ТВЕЛ, використовувати фрактальні властивості структури оболонки та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь розгерметизації ТВЕЛ, шляхом визначення місцезнаходження, типу і розміру дефектів пошкодження оболонки ТВЕЛ.

Висновки до першого розділу

Проведено аналіз існуючих методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ТВЗ ядерного реактора АЕС, який показав, що вони застосовуються для контролю тільки зовнішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, але не враховують зміни внутрішньої структури поверхні оболонки ТВЕЛ, а також не дозволяють враховувати зміни геометричних параметрів (зовнішньої, внутрішньої, діаметр та товщину оболонки) внутрішньої структури оболонки ТВЕЛ, оскільки побудовані на виявленні відсоткового змісту радіоактивних речовин та інертних газів, які спостерігаються у теплоносії після розгерметизації ТВЕЛ. Крім того, розглянуті сучасні методи контролю не відстежують динаміку процесу пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ та не дозволяють визначити критерії розгерметизації або герметизації оболонки ТВЕЛ.

Обґрунтовано, що питання щодо оснащення АЕС сучасними методами контролю герметичності оболонок ТВЕЛ, що забезпечують безпеку експлуатації технологічного обладнання атомної електростанції, мають високу ступінь надійності та оперативності у виявленні аварійних ситуацій у режимі реального часу є відкритим.

Показано, що для контролю герметичності оболонки ТВЕЛ застосовуються різні методи контролю, які мають характерні недоліки, які не дозволяють визначити місцезнаходження, тип та розміри дефектів пошкодження та руйнування на поверхні оболонки ТВЕЛ.

Встановлено, що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік запізнілих нейтронів, активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності ТВЕЛ.

Виявлено, що для розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу оболонки, як правило, вводяться обмеження та припущення щодо геометричних прирощень, що призводять до приближених і неточних характеристик у

використовуваних системах КГО ТВЕЛ, оскільки не враховується структурно-фазовий стан структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, а до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації.

Проаналізовано, що застосування існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, для виявлення поверхневих та внутрішніх дефектів у вигляді локальної неоднорідності, мікро- та макропор, різноманітних тріщин, відрізняється малою ефективністю, представляє трудомісткий процес, що вимагає додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Розглянуто вимоги до сучасних систем КГО ТВЕЛ, а також видів контролю, які сьогодні в них застосовуються для визначення розгерметизації ТВЕЛ.

Показано, що необхідне удосконалення систем КГО, для дистанційного автоматизованого визначення негерметичного ТВЕЛ, без вилучення його із тепловиділяючої збірки ядерного реактора типу ВВЕР-1000 АЕС.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЛЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНОЇ ГЕОМЕТРІЇ

2.1 Обґрунтування фрактального підходу для дослідження фізичних процесів, що викликають пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки тепловидляючого елемента

2.1.1 Загальна схема фрактального підходу

Для вивчення реального процесу ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ, необхідно дослідити фізичні процеси утворення та поведінки мікро- та макроскопічних дефектів (локальних неоднорідностей, мікропор, магістральних та поздовжніх макротріщин) у всьому об'ємі структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

При цьому, необхідно враховувати процеси, що відбуваються не тільки на зовнішній поверхні оболонки із зовнішніми ушкоджуючими дефектами, а також слід вивчити вплив внутрішніх структурно-фазових змін на мікро- і макроскопічні характеристики матеріалу оболонки ТВЕЛ, особливо при утворенні наскрізних тріщин, які призводять до розгерметизації ТВЕЛ.

Однак, складним та неоднозначним залишається одне з основних завдань механіки пошкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ – коректний перехід від мікроскопічного опису, коли необхідно враховувати властивості елементарних структурних одиниць, до макроскопічного опису наскрізної тріщини в оболонці ТВЕЛ [60 – 76].

Ця проблема може бути вирішена, якщо розробки математичної моделі поведінки макроскопічних ушкоджуючих дефектів (наскрізних тріщин), будуть враховані властивості структури, які полягають у тому, що її характеристики геометрично подібні, тобто прояв автосподібності.

Отже, для опису процесу ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ необхідно використовувати і враховувати характеристики, що описують геометричні особливості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Велике значення у дослідженні структурних особливостей наскрізних тріщин, що формуються в оболонці ТВЕЛ, займають дослідження зовнішніх і внутрішніх поверхонь ушкодження і руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Це пояснюється припущенням, що структурні особливості поверхні ушкодження та руйнування є прямою «спадщиною» структури фронту наскрізної тріщини, що призвела до ушкодження та руйнування внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ.

Як відомо [60 – 76], структури з мікро- та макроскопічними дефектами (локальні неоднорідності, мікропори, магістральні та поздовжні макротріщини), мають фрактальні властивості самоподібності, інваріантності та масштабованості.

Це обґрунтовує і свідчить про те, що ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ на всіх структурних рівнях має фрактальні властивості.

Отже, дослідження такої фрактальної структури може бути проведене на основі фрактального аналізу.

Крім того, згідно з [60 – 76], кількісним показником дисипативної властивості енергії (це стійкий стан, що виникає в нерівноважному середовищі за умови дисипації або розсіювання енергії, що надходить ззовні) матеріалу при самоподібному пошкодженні та руйнуванні оболонки, є величина фрактальної розмірності, яка враховує ступінь заповненості порового простору структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Звідки випливає, що в якості критерія оцінки ступеня ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ, запропоновано використовувати величину фрактальної розмірності.

Величина фрактальної розмірності дозволяє визначати фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ, з урахуванням структурно-фазових змін у всьому об'ємі матеріалу оболонки з ушкоджуючими дефектами на її зовнішній та внутрішній поверхні [81, 82].

Внаслідок труднощів методичного характеру, досить складно отримати системні експериментальні дані про розмірну неоднорідність ушкоджуючих дефектів, що охоплюють різні матеріали та умови їх навантаження, а також масштабність ушкодження і руйнування оболонки ТВЕЛ.

Тому, для вирішення практичних завдань прогнозування граничного стану, пов'язаного з формуванням наскрізних тріщин недопустимого розміру (більше 50 мкм).

Необхідна подальша розробка адекватних математичних моделей, які враховують розмірну неоднорідність ушкоджуючих дефектів на зовнішній і внутрішній оболонці ТВЕЛ [81, 82].

При цьому необхідно вдосконалити методи систем КГО для визначення критерію оцінки ступеня ушкодження та руйнування оболонки при розгерметизації ТВЕЛ в режимі реального часу [245].

Даний критерій повинен бути фактичною реальною величиною для оцінки ступеня герметичності ТВЕЛ, яку можна було б використовувати для всіх завдань, вирішення яких пов'язане зі зміною геометричних характеристик з фрактальними приростами, в процесі ушкодження і руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ [81, 82].

Таким чином, вибір та застосування фрактального підходу до дослідження структури матеріалу оболонки з поверхневими дефектами дозволяє розробити метод для систем КГО, за визначенням фактичного критерію оцінки ступеня герметичності (розгерметизації) ТВЕЛ у вигляді кількісної величини фрактальної розмірності.

Необхідно зауважити, що фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ, обов'язково містять деякі питомі характеристики: на одиницю довжини, площі або об'єму структури матеріалу оболонки з ушкодженими поверхнями, при цьому виникає ряд протиріч експериментальним даним.

Введення фрактальної поправки при визначенні питомих характеристик у моделях ушкодженості оболонки ТВЕЛ, дозволить врахувати ушкодженість та руйнування поверхні, а також автотодельність процесу руйнування оболонки ТВЕЛ [81, 82].

Загальна схема фрактального підходу передбачає такі етапи:

- на мікрорівні, тобто мікропори та мікротріщини до 30 мкм, апроксимуються відповідним фрактальним об'єктом з фрактальною розмірністю $1 < d_f < 2$;
- на макрорівні, тобто макротріщини (до 50 мкм) і наскрізні тріщини (від 50 мкм і вище) апроксимуються відповідним фрактальним об'єктом з фрактальною розмірністю $2 < d_f < 3$.

Таким чином, фрактальний підхід дозволяє залучати до вирішення завдань оцінки стану оболонки, додатковий параметр у вигляді фрактальної розмірності, що характеризує геометричні особливості мікро- та макроструктури при розвитку та утворенні реальної наскрізної тріщини, а також відображає той факт, що процес ушкодження та руйнування оболонки – це сукупність процесів мікро- та макрорівнів у її структурі.

Слід зазначити, що застосування фрактального підходу до моделювання на мікро- та макрорівні рівні, реальних наскрізних тріщин, передбачає деяке обмеження та припущення: – як звивистість реальної тріщини, так як і її площа, мають кінцеві значення, тому існує природна нижня межа застосування фрактальної моделі (наприклад, мікропори розміром менше 8 мкм), тобто нижню межу слід розуміти не у математичному, а у фізичному сенсі.

З іншого боку, математичний фрактал нескінченно звивистий тому, має нескінченну довжину, тобто фрактальна модель може мати і верхню межу застосування, яка пов'язана з геометричними розмірами тіла, розмірами наскрізної тріщини, характерним масштабом неоднорідності зовнішніх полів і та інше [81, 82].

Таким чином, кінцівка інтервалу, на якому проявляються фрактальні властивості фізичного об'єкта, визначається тим, що при знаходженні фрактальних характеристик повинен вибиратися даний інтервал, виходячи із завдань дослідження (наприклад, активна ділянка на аксіальних сегментах поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ).

Всі отримані за допомогою фрактальних об'єктів співвідношення на практиці можуть бути використані в моделях ушкодженої оболонки при розробці методів для систем КГО [245].

2.1.2 Обґрунтування вибору об'єктів та методу проведення досліджень структури матеріалу ушкодженої оболонки тепловиділяючого елемента

Проведемо обґрунтування вибору об'єктів та методу проведення досліджень структури матеріалу ушкодженої оболонки тепловиділяючого елемента. Запропоновано аналіз та дослідження структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, проводити на основі фрактально-кластерної просторової геометричної моделі.

Для цього запропоновано розробити та побудувати фізичну (геометричну) модель структури матеріалу оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнього циліндра.

Геометрична фігура порожнього циліндра дозволить провести теоретичні дослідження фізичних процесів, що впливають на збільшення геометричних параметрів, як на зовнішній та внутрішній поверхні, так і в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Наявність мікропор і макротріщин у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, безпосередньо пов'язана з поверхневими дефектами, які викликані зовнішніми та внутрішніми ушкоджуючими факторами, аналіз яких проведено у розділі 1.

Так, спочатку утворюються локальні неоднорідності та мікропори нанометрового розміру (5...70 нм), які розширюючись поздовжньо і радіально, утворюють мезопори (0,05...2 мкм), з'єднуючи їх у тривимірному переплетенні в макропори (1...50 мкм).

Таким чином, у процесі впливу ушкоджуючих факторів утворюються дефекти на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ, які формують пористу структуру матеріалу і дифундують в неї, викликаючи її динамічні зміни.

Під час експлуатації ТВЕЛ, пориста структура матеріалу взаємодіє з різноманітними середовищами та зазнає змін та властивостей.

Однією з властивостей пористої структури, як відомо [60 – 76], є інваріантність, масштабованість і самоподібність, тобто фрактальність.

Для контролю фізичних процесів, які протікають в оболонці при розгерметизації ТВЕЛ, необхідно докладне дослідження структури матеріалу.

Для інтерпретації даних структурних досліджень, а також для вивчення та моделювання фізичних процесів актуальною є задача побудови адекватної моделі пористої структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, на основі застосування апарату фрактально-кластерної геометрії.

В якості моделі поверхневого шару матеріалу оболонки ТВЕЛ, запропоновано використовувати порожнисте циліндричне геометричне тіло в тривимірній системі координат.

Фізична модель, у вигляді геометричної моделі порожнистого циліндра із зовнішнім (9,1 мм) та внутрішнім (7,73 мм) діаметром, імітує оболонку ТВЕЛ, в якій відбуваються фізико-механічні процеси, що впливають на зміну властивостей внутрішньої структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, а також дозволяє провести чисельне дослідження пористої структури дворівневої просторової моделі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

2.2 Розробка фізичної моделі оболонки ТВЕЛ

2.2.1 Розробка фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнього циліндра

Розглянемо, максимально наближену до наших досліджень, фізичну модель оболонки ТВЕЛ, яка є геометричною фігурою у вигляді порожнистого циліндра (рис. 2.1).

При цьому, прийmemo припущення, що в нашій фізичній моделі, фрактальність наночарів полісферової структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, властива як зовнішній, так і внутрішній поверхонь.

Також врахуємо всі геометричні параметри порожнистого циліндра при розрахунку фрактальних розмірностей всієї поверхні, як показано на (рис. 2.1):

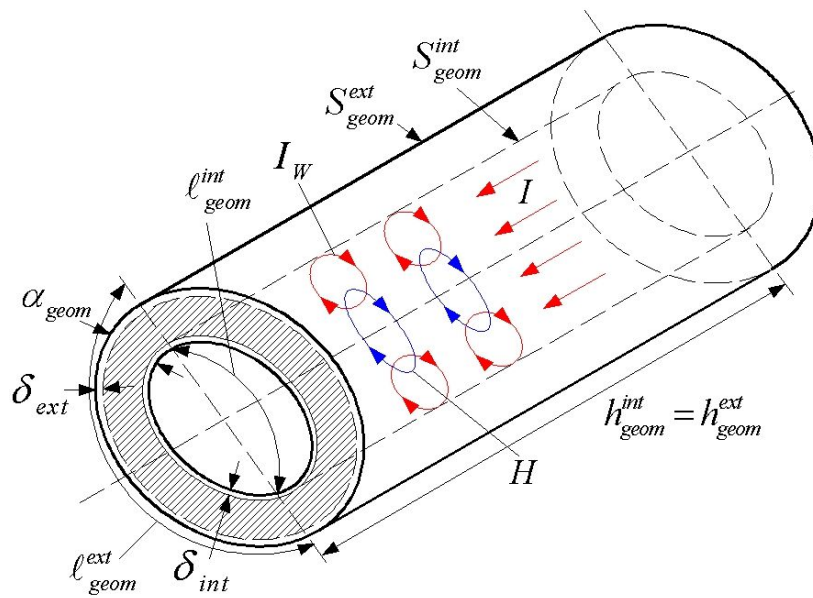


Рис. 2.1. Фізична модель оболонки тепловиділяючого елемента у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра: h_{geom}^{int} – поздовжня геометрична довжина зовнішньої поверхні порожнистого циліндра; h_{geom}^{ext} – поздовжня геометрична довжина внутрішньої поверхні порожнистого циліндра; ℓ_{geom}^{int} – геометрична довжина кола зовнішньої поверхні порожнистого циліндра; ℓ_{geom}^{ext} – геометрична довжина кола внутрішньої поверхні порожнистого циліндра; α_{geom} – геометрична товщина стінки порожнистого циліндра; S_{geom}^{ext} – геометрична площа зовнішньої поверхні порожнистого циліндра; S_{geom}^{int} – геометрична площа внутрішньої поверхні порожнистого циліндра; δ_{ext} – зовнішня глибина (товщина) скін-шару; δ_{int} – внутрішня глибина (товщина) скін-шару.

В роботі, для розробки методики проведення розрахунків величин фрактальних розмірностей, було обрано вищевказані геометричні параметри фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра (рис. 2.1).

2.2.2 Застосування скін-ефекту для дослідження фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра

Розглянемо механізм виникнення скін-ефекту у запропонованій фізичній моделі у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра (рис. 2.1).

Змінний струм у провіднику породжує змінне вихрове магнітне поле, силові лінії якого перпендикулярні до осі провідника (рис. 2.1).

За рахунок електромагнітної індукції змінне магнітне поле H породжує вихрове електричне поле, що викликає перебіг вихрового струму Фуко.

При цьому на поверхні провідника вихровий струм I_w спрямований у напрямку струму провідника, а всередині провідника – у протилежний напрямок. Це явище знижує струм у серцевині провідника та збільшує поверхневий струм.

Розгляд розподілу щільності струму в порожнистому циліндричному провіднику в поперечному перерізі (рис. 2.1), показав, що для змінного струму щільність струму, експоненційно убуває від поверхні вглиб провідника.

Товщина скін-шару δ_{skin} визначається як глибина від поверхні, на якій щільність струму зменшується до 37% значення на поверхні тобто від товщини оболонки. Ця товщина залежить від частоти струму та електро-магнітних властивостей провідника.

Щільність струму максимальна біля провідника (рис. 2.1). При віддаленні від поверхні, вона зменшується експоненційно і на глибині e/l стає менше в e раз (приблизно на 70%), тобто ця глибина і є товщиною скін-шару.

Припустимо, що вздовж порожнистого циліндра, прикладений змінний електричний потенціал з амплітудою U та частотою ω , тоді відповідна глибина скін-шару δ_{skin} , згідно [259], визначається виразом (2.1):

$$\delta_{skin} = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \omega}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\omega}}, \quad (2.1)$$

де δ_{skin} – глибина скін-шару;

μ – магнітна проникність матеріалу;

μ_0 – магнітна постійна матеріалу;

ω – частота змінного електричного потенціалу;

σ – електропровідність матеріалу.

Таким чином, викладені вище міркування щодо масштабної інваріантності досліджуваної структури фізичної моделі оболонки ТВЕЛ показують, що скін-ефект є перспективним засобом вимірювання фрактальних розмірностей геометричних параметрів оболонки геометричної фігури у вигляді порожнистого циліндра.

2.2.3 Дослідження геометричних параметрів фізичної моделі ТВЕЛ з використанням апарату фрактальної геометрії

Відповідно до теорії фракталів [60 – 76], для довільної фрактальної зовнішньої та внутрішньої поверхні порожнистого циліндра повинні виконуватися такі нерівності (2.2) і (2.3):

$$S_f^{ext} \neq h_{geom}^{ext} \cdot \ell_{geom}^{ext} \quad (2.2)$$

$$S_f^{int} \neq h_{geom}^{int} \cdot \ell_{geom}^{int} \quad (2.3)$$

Отже, на підставі виразів (2.2) та (2.3), для загальної фрактальної площі всієї поверхні порожнистого циліндра $\sum S_{geom}$, має виконуватися така нерівність (2.4):

$$\sum S_f \neq S_f^{ext} + S_f^{int} \neq (h_{geom}^{ext} \cdot \ell_{geom}^{ext}) + (h_{geom}^{int} \cdot \ell_{geom}^{int}) \quad (2.4)$$

Згідно з теорією фракталів [60 – 76], величина довжини порожнистого циліндра, яка відрізняється від геометричної довжини, на величину деякого геометричного збільшення, є фрактальною величиною цієї довжини.

Отже, маємо фрактальні величини поздовжніх h_f^{ext}, h_f^{int} та поперечних $\ell_f^{ext}, \ell_f^{int}$ довжин, які породжують на зовнішній S_f^{ext} та внутрішній S_f^{int} фрактальній поверхні

порожнього циліндра, фрактальні розмірності $d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}, d_{\ell_f^{ext}}, d_{\ell_f^{int}}, d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}}$ для геометричних параметрів ТВЕЛ.

Тому їх можна задати такими виразами:

$$d_{h_f^{ext}} = \frac{\ln(h_f^{ext} / \delta_{ext})}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.5)$$

звідки випливає, що висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки, визначається виразом (2.6):

$$h_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 1}}; \quad (2.6)$$

$$d_{h_f^{int}} = \frac{\ln(h_f^{int} / \delta_{int})}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.7)$$

звідки висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки, визначається виразом (2.8):

$$h_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 1}}; \quad (2.8)$$

$$d_{\ell_f^{ext}} = \frac{\ln(\ell_f^{ext} / \delta_{ext})}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.9)$$

звідки випливає, що поперечна довжина ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні товщини оболонки, визначається виразом (2.10):

$$\ell_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 1}}; \quad (2.10)$$

$$d_{\ell_f^{int}} = \frac{\ln(\ell_f^{int} / \delta_{int})}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.11)$$

звідки слідує, що поперечна довжина ТВЕЛ з фрактальним прирощенням по внутрішній поверхні товщини оболонки, визначається виразом (2.12):

$$\ell_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 1}}; \quad (2.12)$$

$$d_{S_f^{ext}} = \frac{\ln(S_f^{ext} / \delta_{ext}^2)}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.13)$$

звідки випливає, що площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки; визначається виразом (2.14):

$$S_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 2}}; \quad (2.14)$$

$$d_{S_f^{int}} = \frac{\ln(S_f^{int} / \delta_{int}^2)}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.15)$$

звідки випливає, що площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки визначається виразом (2.16):

$$S_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{h_f^{int}} - 2}}. \quad (2.16)$$

де $d_{h_f^{ext}}$ – величина фрактальної розмірності висоти ТВЕЛ по зовнішній поверхні оболонці;

$d_{h_f^{int}}$ – величина фрактальної розмірності висоти ТВЕЛ по внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ;

$d_{S_f^{ext}}$ – величина фрактальної розмірності площі зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ;

$d_{S_f^{int}}$ – величина фрактальної розмірності площі внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ;

h_f^{ext} – висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки;

h_f^{int} – висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки;

S_f^{ext} – площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки;

S_f^{int} – площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки;

δ_{ext} – глибина скін-шару на зовнішній поверхні оболонки порожнистого циліндра;

δ_{int} – глибина скін-шару на внутрішній поверхні оболонки порожнистого циліндра.

Підставляючи вирази (2.14) і (2.16) у вираз (2.4), отримуємо аналітичний вираз (2.17) для розрахунку загальної фрактальної площі $\sum S_f$ для внутрішньої та зовнішньої поверхні фізичної моделі порожнистого циліндра:

$$\sum S_f = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-2}} + \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}}-2}}. \quad (2.17)$$

Якщо абстрагуватися від розгляду характеру фрактальних розмірностей на зовнішній та внутрішній поверхнях фізичної моделі порожнистого циліндра, то у загальному випадку справедливі нерівності:

1. $1 \leq d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}, d_{\ell_f^{ext}}, d_{\ell_f^{int}} < 2$ (рівність виконується для гладких кривих, що диференціюються);
2. $2 \leq d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}} < 3$ (рівність виконується для гладких поверхонь, що диференціюються).

2.3 Дослідження моделі ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

2.3.1 Дослідження моделі ушкодженості оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

Як відомо [147, 252 – 254], при контролі розгерметизації оболонки ТВЕЛ, визначення параметра ушкодженості оболонки ТВЕЛ визначається виразом (2.18):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (2.18)$$

де $\omega(\tau)$ – параметр ушкодженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ;

A_0 – питоме розсіювання енергії, що характеризує неушкодженість структури матеріалу оболонки ТВЕЛ;

$A(\tau)$ – питоме розсіювання енергії, що характеризує інтенсивність ушкодження структури матеріалу оболонки ТВЕЛ за час τ і визначається виразом (2.19):

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) dr, \quad (2.19)$$

де $W(\tau)$ – питома потужність розсіювання, що характеризує інтенсивність процесу повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ у будь-який момент часу та визначається виразом (2.20):

$$W(\tau) = G_e \cdot \rho_e, \quad (2.20)$$

де ρ_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ.

G_e – еквівалентна напруга, найпростішої одновимірної моделі, при допущенні ізотропності матеріалу оболонки ТВЕЛ, визначається виразом (2.21):

$$G_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(G_\theta - G_r)^2 + (G_r - G_z)^2 + (G_z - G_\theta)^2 \right]}, \quad (2.21)$$

де G_θ, G_r, G_z – напруги у напрямках координат θ, r, z .

Еквівалентна деформація повзучості оболонки ТВЕЛ для всіх розглянутих режимів навантаження ядерного реактора типу ВВЕР-1000 поступово збільшується з часом.

Тому швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки розраховується з урахуванням радіаційних ефектів і подається у вигляді функції від параметрів, показаної у виразі (2.22):

$$\rho_e = K \cdot \Phi \left(G_e + B \cdot e^{C \sigma_e} \right) \cdot \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2}, \quad (2.22)$$

де ρ_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ, c^{-1} ;

Φ – щільність потоку швидких нейтронів, $1/\text{м}^2\cdot\text{с}$;

T – температура, К;

R – газова постійна;

G_e – еквівалентна напруга, Па;

t – час протікання деформації, с;

$K = 5,129 \cdot 10^{-29}$; $B = 7,252 \cdot 10^2$; $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$ – безрозмірні коефіцієнти.

Згідно із законом розподілу нейтронного потоку за довжиною ТВЕЛ, щільність потоку швидких нейтронів $\Phi(z)$ на аксіальному сегменті z ($0 \leq z \leq H_{geom}$), визначається виразом (2.23):

$$\Phi(z) = \cos \left[\frac{\pi}{H_{ef}} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right], \quad (2.23)$$

де H_{geom} – геометрична довжина (висота) ТВЕЛ;

z – аксіальний сегмент, тобто ділянка довжини ТВЕЛ, для визначення щільності потоку швидких нейтронів $\Phi(z)$;

$H_{ef} = H_{geom} + 2\delta_{ef}$ – передбачувана довжина (висота) ТВЕЛ з урахуванням величини ефективної добавки ($\delta_{ef} \approx 10$ см).

Як показує практика, розрахунки передбачуваної довжини (висоти) ТВЕЛ H_{ef} з урахуванням величини ефективної добавки δ_{ef} , згідно з виразом (2.23), мають дуже приблизний характер.

Крім того, це в цілому призводить до похибок у обчисленнях основних прийнятих режимних характеристик при роботі ядерного реактора ВВЕР-1000, таких як: щільність потоку швидких нейтронів; лінійного питомого енерговиділення та ін.

Тому, в моделях ушкодженості оболонки ТВЕЛ, необхідно враховувати реальне збільшення (подовження) висоти ТВЕЛ, внаслідок розтягування, розбухання і повзучості оболонки, під впливом ушкоджуючих дефектів.

При цьому, у матеріалі оболонки, відбуваються структурно-фазові зміни, з утворенням локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин, а, отже, така структура згідно [60 – 76], має фрактальні властивості.

Таким чином, з урахуванням вищесказаного, при розрахунку реальної довжини ТВЕЛ, у роботі запропоновано, враховувати її фрактальне збільшення, згідно з виразом (2.24):

$$H_f = H_{geom} + \Delta H_f, \quad (2.24)$$

де H_f – фрактальна (реальна) довжина ТВЕЛ;

ΔH_f – фрактальне прирощення довжини ТВЕЛ.

Тоді, ґрунтуючись на сказаному вище, вираз (2.23) набуде вигляду (2.25):

$$\Phi(z) = \cos \left[\frac{\pi}{H_{geom} + \Delta H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] = \cos \left[\frac{\pi}{H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right]. \quad (2.25)$$

Підставляючи проміжні вирази (2.20 – 2.25), у формулу (2.18) та перетворивши її до аналітичного вигляду (2.26), отримуємо вдосконалену математичну модель, для визначення параметра ушкодженості оболонки ТВЕЛ з урахуванням фрактальної довжини:

$$\omega(\tau) = \frac{1}{A_0} \int_0^\tau \left\{ \begin{aligned} & G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \times \\ & \times \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \cdot \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \end{aligned} \right\} \cdot dr \quad (2.26)$$

Для знаходження фрактальної довжини H_f ТВЕЛ, у роботі запропоновано використовувати апарат фрактальної геометрії, на прикладі фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра, як було показано у підрозділі 2.1.3.

Для цього було запропоновано використовувати вираз (2.6) для визначення висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки та вираз (2.8) для визначення висоти ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній

поверхні оболонки.

Крім того, аналітичний вираз (2.26) можна прийняти як для умови руйнування оболонки ТВЕЛ так і для визначення критерію розгерметизації.

Тепловиділяючий елемент, можна вважати герметичним, при виконанні наступних умов ушкодження та руйнування оболонки (2.27):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} \leq 1, \quad (2.27)$$

при $H_f / H_{geom} \leq 1$.

Звідки, ТВЕЛ негерметичний, за умови ушкодження та руйнування оболонки (2.28):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} > 1, \quad (2.28)$$

при $H_f / H_{geom} > 1$.

На основі вище викладених обґрунтувань були запропоновані аналітичні вирази, що визначають удосконалену модель ушкодження оболонки ТВЕЛ, на основі врахування фрактальних властивостей структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Підставляючи значення висоти ТВЕЛ, з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки з виразу (2.6) у вираз (2.26), отримуємо аналітичний вираз (2.27) для вдосконаленої моделі ушкодженості зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ на основі застосування апарату фрактальної геометрії:

З виразу (2.27) випливає, що ушкодженість зовнішньої поверхні оболонки залежить від зміни фрактальної розмірності $d_{h_f^{ext}}$ та величини глибини скін-шару δ_{ext} на зовнішній поверхні оболонки ТВЕЛ.

$$\omega_{ext}(\tau) = \frac{1}{A_0} \cdot \int_0^\tau \left\{ G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{1} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \times \right. \\ \left. \times \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \right\} \cdot dr \quad (2.27)$$

Аналогічним чином, підставляючи значення висоти ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки з виразу (2.8) у вираз (2.26), отримуємо аналітичний вираз (2.28) для визначення ушкодження внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ.

$$\omega_{int}(\tau) = \frac{1}{A_0} \cdot \int_0^\tau \left\{ G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{1} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \times \right. \\ \left. \times \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \right\} \cdot dr \quad (2.28)$$

З виразу (2.28) випливає, що ушкодженість внутрішньої поверхні оболонки залежить від зміни фрактальної розмірності $d_{h_f^{int}}$ та величини глибини скін-шару δ_{int} на внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ.

2.3.2 Дослідження моделі деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

При моделюванні процесу деформації структури матеріалу оболонки ТВЕЛ (наприклад: матеріал із сплаву цирконію та номібію), необхідно враховувати також зміни робочої температури ($T = 360^{\circ} C$) та внутрішнього тиску ($P_{int} = 2,8 MPa$), викликаного накопиченням продуктів поділу ядерного палива у просторі між внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ та таблеткою ядерного палива.

Проведемо дослідження моделі деформації оболонки ТВЕЛ, з урахуванням робочих температури та тиску, яка як відомо [177, 180, 252], визначається формулою (2.29):

$$\sigma_T = \frac{P}{2\pi \cdot S_{geom}^s} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{int}^{geom}} \right) \quad (2.29)$$

де σ_T – показник деформації при $T = 360^0 \text{ C}$;

P – робочий тиск (2,8 МПа);

S_{geom}^s – геометрична площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ;

α – геометрична товщина стінки оболонки ТВЕЛ;

d_{geom}^{int} – внутрішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ.

З формули (2.29) видно, що в процесі деформації оболонки ТВЕЛ при подальших змінах величини температури ($T_{work} > 360^0 \text{ C}$) та тиску ($P_{work} > 2.8 \text{ МПа}$), не враховується зміна прирощень геометричних параметрів оболонки ТВЕЛ, яка відбувається в результаті повзучості, набухання, розтріскування структури матеріалу (Zr + 1 % Nb) оболонки ТВЕЛ.

З виразу (2.29) також видно, що не враховується динаміка зміни неоднорідності структури, тобто її структурно-фазовий стан, в залежності від появи локальних новоутворень, мікропор та макротріщин в об'ємі матеріалу оболонки ТВЕЛ. Як видно з (рис. 2.2), геометрична площа S_{geom}^s поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ визначається виразом (2.30):

$$S_{geom}^s = \frac{\pi}{4} (d_{ext}^2 - d_{int}^2) \quad (2.30)$$

де S_{geom}^s – площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ;

d_{ext} – зовнішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ;

d_{int} – внутрішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ.

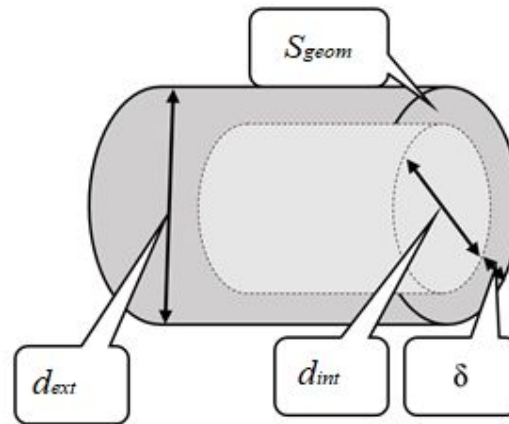


Рис. 2.2. Геометрична фігура порожнистого циліндра

Формула (2.30), може бути застосована лише для ідеально гладкої поверхні, не враховуючи впливу ушкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ, тобто при постійних значеннях зовнішнього та внутрішнього геометричного діаметра ушкодженої оболонки ТВЕЛ, а значить незмінною товщиною оболонки порожнистого циліндра.

Тому, з урахуванням вище сказаного, у роботі, була запропонована вдосконалена модель деформації структури оболонки ТВЕЛ з урахуванням неоднорідності її структури та з урахуванням використання апарату фрактально – кластерної геометрії, відповідно до виразу (2.31):

$$\sigma_T = \frac{P}{2\pi \cdot S_f^s} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{geom}^{int}} \right) \quad (2.31)$$

де S_f^s – фрактальна площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ, що враховує фрактальні збільшення товщини стінки оболонки ТВЕЛ.

Відомо, що зміна структурно-фазового стану відбувається по всій фрактальній поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, тому її фрактальна площа S_f^Σ буде включати

фрактальні площі бічної зовнішньої S_f^{ext} та внутрішньої S_f^{int} поверхні, а також загальну фрактальну площу S_f^s поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ, згідно з виразом (2.32):

$$S_f^\Sigma = (S_f^{ext} + S_f^{int}) + \Sigma S_f^s \quad (2.32)$$

Виходячи з виразу (2.32), можна визначити величину фрактальної площі поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ згідно (2.33):

$$S_f^s = \frac{S_f^\Sigma - (S_f^{ext} + S_f^{int})}{2} \quad (2.33)$$

Тоді підставляючи вираз (2.33) у (2.29), отримуємо формулу (2.34) для розрахунку показника деформації, з урахуванням фрактальної площі внутрішньої і зовнішньої поверхні ушкодженої оболонки ТВЕЛ:

$$\sigma_T = \frac{P}{\pi \cdot [S_f^\Sigma - (S_f^{ext} + S_f^{int})]} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{geom}^{int}} \right). \quad (2.34)$$

Де:

$$S_f^\Sigma = 2\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) + 2\pi \cdot h_f (r_{ext} + r_{int}) \quad (2.35)$$

$$S_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext} d_{S_f^{ext}}^{-2}} \quad (2.36)$$

$$S_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}}-2}} \quad (2.37)$$

$$h_f = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-1}}; \quad (2.38)$$

З урахуванням співвідношень (2.35), (2.36), (2.37) і (2.38), перетворимо вираз (2.34) до наступного виду (2.39):

$$\sigma_r = \frac{P \left(1 + \frac{2\delta}{r_{int}} \right)}{\left\{ \left[4\pi^2 (r_{ext} + r_{int}) \left[(r_{ext} - r_{int}) + \left(\frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-1}} \right) \right] \right] \right\} - 2\pi \cdot \left(\frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-2}} + \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}}-2}} \right)} \quad (2.39)$$

З формули (2.39) видно, що в процесі деформації оболонки ТВЕЛ при подальших змінах величини температури ($T_{work} > 360$ °C) та тиску ($P_{work} > 2.8$ МПа), враховується зміна збільшення фрактальної величини площі товщини стінки оболонки ТВЕЛ у залежності від фрактальної розмірності зовнішньої $d_{S_f^{ext}}$ та внутрішньої $d_{S_f^{int}}$ поверхні по всій фрактальній висоті h_f оболонки ТВЕЛ.

При цьому необхідно відзначити, що зі зменшенням або збільшенням фрактального приросту товщини стінки оболонки, що впливає на його поперечний переріз, ступінь деформації завжди збільшується, так процес звуження або набухання впливає на форму і геометрію оболонки ТВЕЛ.

Це пояснюється тим, що площа поперечного перерізу оболонки ТВЕЛ, зменшується з допомогою збільшення пористості, тобто збільшення кількості мікропор та макротріщин у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ призводить до утворення кластер-кластерних агрегацій у пористій структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Основною кількісною величиною [181, 182], що характеризує ступінь заповненості простору площі поперечного перерізу оболонки S_f^s , є фрактальна розмірність товщини стінки оболонки порожнистого циліндра, яка визначатиметься з виразів (2.40) та (2.41), отриманих за результатами досліджень фізичної моделі оболонки у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра:

$$d_{S_f^{ext}} = \frac{\ln(S_f^{ext} / \delta_{ext}^2)}{\ln(1 / \delta_{ext})} \quad (2.40)$$

$$d_{S_f^{int}} = \frac{\ln(S_f^{int} / \delta_{int}^2)}{\ln(1 / \delta_{int})} \quad (2.41)$$

2.4 Дослідження фрактальної структури матеріалу оболонки порожнистого циліндра на основі скін-ефекту

Як відомо [182], енергія, що розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра, визначається виразом (2.42):

$$P_{\Sigma} = P_{ext} + P_{int}, \quad (2.42)$$

де P_{Σ} – енергія, яка розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра;

P_{ext} – енергія розсіювання зовнішньою поверхнею порожнистого циліндра, яка визначається виразом (2.43);

P_{int} – енергія розсіювання внутрішньою поверхнею порожнистого циліндра, яка визначається виразом (2.44).

$$P_{ext} = \int j_{ext}(r_{ext}) \cdot E_{ext}(r_{ext}) \cdot d_{ext}^3 \cdot r_{ext}, \quad (2.43)$$

$$P_{int} = \int j_{int}(r_{int}) \cdot E_{int}(r_{int}) \cdot d_{int}^3 \cdot r_{int}. \quad (2.44)$$

де $j_{ext}(r_{ext})$ – щільність струму на зовнішній поверхні зразка;

$j_{int}(r_{int})$ – щільність струму на внутрішній поверхні зразка;

$E_{ext}(r_{ext})$ – електричне поле в точці $r_{зовн}$, на зовнішній поверхні зразка;

$E_{int}(r_{int})$ – електричне поле в точці $r_{внутр}$, на внутрішній поверхні зразка;

r_{ext} – зовнішній радіус оболонки зразка порожнистого циліндра;

r_{int} – внутрішній радіус оболонки зразка порожнистого циліндра.

За законом Ома, щільність струму на поверхні провідника визначається як $j(r) = \sigma \cdot E(r)$, де σ – електропровідність, що дозволяє записати співвідношення (2.43) та (2.44), у вигляді виразів (2.45) та (2.46):

$$P_{ext} = \sigma_{ext} \int E_{ext}^2 \cdot d_{ext}^3 \cdot r_{ext} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \int_{skin} d_{ext}^3 \cdot r_{ext} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext} \quad (2.45)$$

$$P_{int} = \sigma_{int} \int E_{int}^2 \cdot d_{int}^3 \cdot r_{int} = \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \int_{skin} d_{int}^3 \cdot r_{int} = \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{int} \cdot \delta_{int} \quad (2.46)$$

де «скін» – означає об'єм $V \equiv \int_{skin} d^3 \cdot r = S \cdot \delta$ шару речовини, у якому електричне

поле істотно чиним відмінне від нуля, через те, що електричне поле зменшується експоненційно в міру просування в глиб матеріалу;

σ_{ext} – електропровідність на зовнішній поверхні провідника;

σ_{int} – електропровідність на внутрішній поверхні провідника.

Тоді, загальне значення енергії, що розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра P_{Σ} , визначається виразом (2.47):

$$P_{\Sigma} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext} + \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{int} \cdot \delta_{int}. \quad (2.47)$$

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} :

$$P_{ext} \approx S_{ext} \delta_{ext} = \delta_{ext}^{3-d_{S_{ext}}}, \quad (2.48)$$

$$P_{int} \approx S_{int} \delta_{int} = \delta_{int}^{3-d_{S_{int}}}. \quad (2.49)$$

Зазначимо, що рівність у виразах (2.48) та (2.49), впливає із співвідношення (2.13) та (2.15).

Використовуючи співвідношення (2.1), перетворимо (2.48) і (2.49) до виду (2.50) та (2.51):

$$P_{ext} = \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{S_{ext}}}{2}}}, \quad (2.50)$$

$$P_{int} = \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{S_{int}}}{2}}}. \quad (2.51)$$

При $d_{S_{ext}} \cong d_{S_{int}} \cong 2$, ці співвідношення відтворюють стандартне значення загальної енергії $P_{\Sigma} = 1/\sqrt{\omega}$, яка розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра.

Необхідно відзначити, що із співвідношення (2.48) і (2.49), слідує залежності для зовнішнього $V_{ext} = \delta_{ext}^{3-d_{S_{ext}}}$ та внутрішнього $V_{int} = \delta_{int}^{3-d_{S_{int}}}$ об'єму структури матеріалу, які при зміні характеристичної довжини порожнистого циліндра, відтворюють величини фрактальних розмірностей на зовнішній та внутрішній поверхні відповідно до виразів (2.13) та (2.15).

Виконавши експеримент із проходженням електричного струму, отримаємо для

значень E_{ext}^2 и E_{int}^2 наступні вирази (2.52) та (2.53):

$$\langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} = V_{ext}^2 / (h_f^{ext})^2 \quad (2.52)$$

$$\langle E_{int}^2 \rangle_{skin} = V_{int}^2 / (h_f^{int})^2 \quad (2.53)$$

Тоді, з урахуванням співвідношень (2.45) та (2.46), маємо:

$$P_{ext} = \frac{\sigma_{ext} \cdot V_{ext}^2 \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext}}{(h_f^{ext})^2} \quad (2.54)$$

$$P_{int} = \frac{\sigma_{int} \cdot V_{int}^2 \cdot S_{int} \cdot \delta_{int}}{(h_f^{int})^2} \quad (2.55)$$

Порівнюючи співвідношення (2.54) та (2.55) з формулою $P=V^2/R$ (де R – електричний опір), отримуємо вирази (2.56) та (2.57) для визначення зовнішнього та внутрішнього електричного опору провідника:

$$R_{ext} = \frac{h_f^{ext2}}{\sigma_{ext} \cdot S_f^{ext} \cdot \delta_{ext}} \quad (2.56)$$

$$R_{int} = \frac{h_f^{int2}}{\sigma_{int} \cdot S_f^{int} \cdot \delta_{int}} \quad (2.57)$$

Зі співвідношень (2.5 – 2.16), знаходимо значення зовнішнього R_{ext} (2.58) та внутрішнього R_{int} електричного опору (2.59), відповідно до виразів (2.56) и (2.57):

$$R_{ext} \sim \frac{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 2d_{h_f^{ext}} - 1}}{\sigma_{ext}} \quad (2.58)$$

$$R_{int} \sim \frac{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 2d_{h_f^{int}} - 1}}{\sigma_{int}} \quad (2.59)$$

або з урахуванням співвідношення (2.1), отримуємо значення зовнішнього R_{ext} (2.60) та внутрішнього R_{int} (2.61) електричного опору залежно від прикладеної частоти ω , у відповідність до виразів (2.58) и (2.59):

$$R_{ext} \approx \omega^{\frac{1+2d_{h_f^{ext}} - d_{S_f^{ext}}}{2}} \quad (2.60)$$

$$R_{int} \approx \omega^{\frac{1+2d_{h_f^{int}} - d_{S_f^{int}}}{2}} \quad (2.61)$$

При $d_{S_f^{ext}} = d_{S_f^{int}} = 2$ та $d_{h_f^{ext}} = d_{h_f^{int}} = 1$ це співвідношення переходить у стандартне $R \approx \sqrt{\omega}$.

Резюмуючи і наносячи експериментальні дані на графіки в координатах $(\ln P_{ext}, \ln \omega; \ln P_{int}, \ln \omega)$ та $(\ln R_{ext}, \ln \omega; \ln R_{int}, \ln \omega)$, отримуємо прямі з кутовими коефіцієнтами: $(d_s - 3)/2$ и $(1 + 2d_h - d_s)$.

Це дозволяє безпосередньо виміряти d_s та d_h (тобто: $d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}}, d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}$).

У згаданому окремому випадку, а саме при $d_{S_f} = d_{h_f} + d_{\ell_f}$, із співвідношень (2.50), (2.51), (2.58), (2.59) отримуємо виразия (2.62 – 2.65):

$$P_{ext} \approx \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{h_f^{ext}} - d_{\ell_f^{ext}}}{2}}} \quad (2.62)$$

$$P_{int} \approx \frac{1}{\omega \frac{3-d_{h_f^{int}}-d_{\ell_f^{int}}}{2}} \quad (2.63)$$

$$R_{ext} \approx \omega \frac{1+d_{h_f^{ext}}-d_{\ell_f^{ext}}}{2} \quad (2.64)$$

$$R_{int} \approx \omega \frac{1+d_{h_f^{int}}-d_{\ell_f^{int}}}{2} \quad (2.65)$$

В іншому окремому випадку, а саме при $d_h = d_\ell = d_S - 1$, із співвідношення (2.50), (2.51), (2.58), (2.59), значення величин P_{ext} , P_{int} , R_{ext} , R_{int} , визначається виразами (2.66 – 2.69) відповідно:

$$P_{ext} \approx \frac{1}{\omega \frac{2-d_{h_f^{ext}}}{2}} \quad (2.66)$$

$$P_{int} \approx \frac{1}{\omega \frac{2-d_{h_f^{int}}}{2}} \quad (2.67)$$

$$R_{ext} \approx \omega \frac{d_{h_f^{ext}}}{2} \quad (2.68)$$

$$R_{int} \approx \omega \frac{d_{h_f^{int}}}{2} \quad (2.69)$$

У цьому випадку один експеримент, наприклад, вимірювання $R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$, як функції від частоти ω дозволяє визначити фрактальні розмірності довжин $d_{h_f^{ext}}$ на

зовнішній та d_{hf}^{int} на внутрішній поверхні порожнистого циліндра.

2.5 Розробка критерію оцінки часу формування та зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки тепловідляючого елемента

При дослідженні фізичних процесів на різних поверхнях (наприклад; зовнішня та внутрішня поверхня матеріалу оболонки тепловідляючого елемента тепловідляючої збірки ядерного реактора атомної електростанції), при виникненні на них ушкоджувальних дефектів, необхідно проводити якісну та кількісну оцінку структурно-фазового стану у всьому об'ємі матеріалу.

У завдання оцінювання входить, визначення критерію стану структур, при зміні геометричних характеристик в залежності від реальної площі поверхні матеріалу зі структурою з локальними неоднорідностями, мікропорами та макротріщинами, які у подальшому утворюють наскрізні тріщини.

Як відомо [60 – 76], такі дисипативні структури, мають властивості масштабованості, інваріантності і фрактальності, а отже, можуть характеризуватися кількісною величиною – фрактальною розмірністю.

Крім того, у сучасних методиках розрахунку оцінки критеріїв стану поверхні, як правило вводяться обмеження та припущення, щодо геометричних прирощень, що призводить до наближених і неточних характеристик у використовуваних системах і пристроях, а, отже, до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації (181, 182).

Тому, постає питання, щодо застосування та розвитку сучасних підходів з вдосконалення методів оцінювання критеріїв стану поверхні матеріалу з ушкодженою поверхнею, на основі застосування апарата фрактально-кластерної геометрії (60 – 76).

На теперішній час існує багато методів контролю ушкодження поверхні матеріалу. До них відносяться методи руйнівного та не руйнівного контролю [125, 126, 157, 158, 193 – 195, 223 – 225, 231 – 232, 245]: капілярні, радіографічні, радіохвильові, маспектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні,

вихорострумової дефектоскопії та ін.

Однак даним методам властиві характерні недоліки [182, 245]:

- прийняті обмеження та припущення з усереднення геометричних характеристик поверхні матеріалу;

- при накопичення ушкоджень поверхні, враховується вплив тільки послідовності сукупностей умов при впливі зовнішніх ушкоджувальних дефектів;

- у якості основного фізичного процесу накопичення ушкоджень, як правило, розглядається процес повзучості матеріалу, без врахування структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації елементів.

- розрахунок ушкодження оболонки, розраховується по граничних умовах, тільки для найнапруженого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті на поверхні матеріалу, що вносить значні усереднення та похибки в розрахунки. Таким чином, аналіз показав, що недостатньо повно розроблені методи контролю і оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, що вимагає їхнього вдосконалення, для визначення критерію якісної та кількісної оцінки структурно-фазового стану в повному об'ємі структури матеріалу.

Моделювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхні різних матеріалів (сплави металів та ін.), традиційними методами, представляється дуже складним і практично неможливим завданням.

Запропоновано використати обчислювальний апарат фрактально-кластерної теорії, для опису процесів, що відбуваються в геометричному об'ємі структури матеріалу на його внутрішній і зовнішній поверхні, при утворенні у них мікропор та мікротріщин. Це дозволить одержати залежності геометричних розмірів мікропор і мікротріщин від зміни фрактальних величин.

Розглянемо теоретичні основи, застосування фрактальної теорії, для опису процесів, що протікають в об'ємі структури матеріалу з ушкоджувальними дефектами реальної поверхні. При фізико-хімічних процесах, що протікають на поверхнях матеріалу, відбуваються реакції зі взаємодії зовнішніх факторів (наприклад, у вигляді різних інертних газів та ін.) з поверхнею.

У результаті такого процесу, в об'ємній структурі матеріалу, утворяться

мікроскопічні локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини (рис. 2.3).

Згідно фрактально-кластерної теорії [60 – 76], вільний поровий простір, можна представити у вигляді окремих кластерів (наприклад, мікропора в структурі матеріалу із цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ, заповнена молекулами газу гелію), які при розширенні порового простору, поєднуються і утворюють макроскопічні твердотільні системи, що складаються із кластерних агрегацій мікропор і кластерні агрегації макротріщин, що мають дробову розмірність.

З цього випливає, що об'єм структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, можна представити, як кластер-кластерну агрегацію порового простору, що складається із кластерних агрегацій мікропор і макротріщин (рис. 2.3).

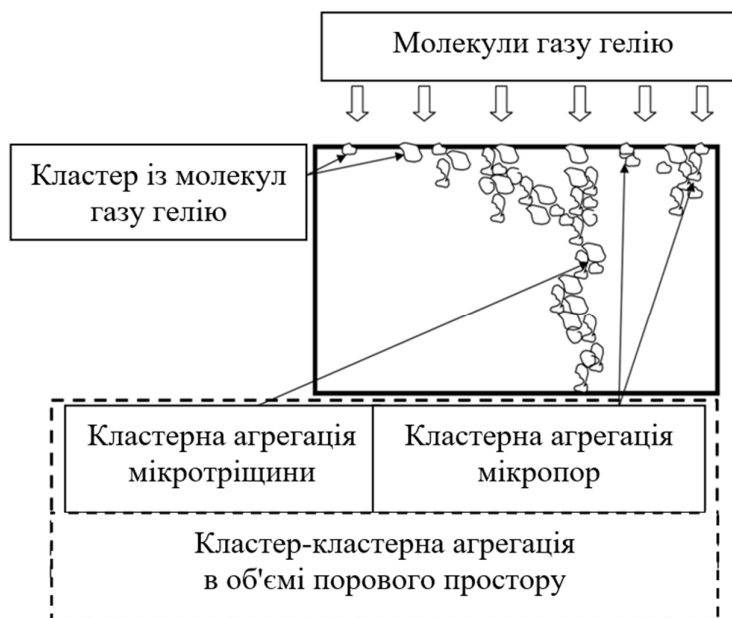


Рис. 2.3. Процес утворення кластер-кластерної агрегації в об'ємі структури матеріалу з ушкодженою поверхнею

Таким чином, для оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, у роботі запропоновано, в якості критерію утворення наскрізної тріщини, приймати час утворення загального кластера (кластер-кластерної агрегації порового простору), що з'єднує зовнішню і внутрішню поверхні.

Утворення кластер-кластерної агрегації відбувається при злитті кластерів

молекул газу (гелію) різних розмірів і форм у мікропорах (рис. 2.3).

На структуру і геометричні властивості кластер-кластерної агрегації впливають умови протікання процесу в об'ємі неоднорідної структури поверхневої плівки, а також характеристики вихідних кластерів молекул газу (гелію), тобто їх розподіл по розмірах.

Тому, за основу при моделюванні процесу виникнення та росту кластер-кластерної агрегації, а також дослідження її властивостей, покладені умови при яких формується кластер-кластерна агрегація і відбуваються початкові структурно – геометричні розподіли структурно утворюючих елементів – кластерів.

Необхідно відзначити, що об'ємна структура кластер-кластерної агрегації, має специфічні фрактальні властивості [245], та характеризується і оцінюється ступенем заповнення об'ємом простору кластер-кластерної агрегації з використанням фрактальної розмірності.

Зміна величини фрактальної розмірності в об'ємній структурі поверхні матеріалу, дозволяє бачити динаміку процесу утворення фрактальної структури кластер-кластерної агрегації, а, отже, оцінювати збільшення і ріст геометричних параметрів.

Таким чином, моделювання фізичного процесу на поверхні матеріалу (наприклад, поверхня цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ), дозволяє досліджувати залежність геометричних параметрів (об'єм, радіус) кластер-кластерних агрегацій, а, отже, і розмірів мікротріщин у структурі матеріалу, від зміни величини фрактальної розмірності.

Це дозволить, у режимі реального часу, відслідковувати утворення наскрізних тріщин в оболонках ТВЕЛ на ранніх стадіях і тим самим запобігти важким аваріям і катастрофи на АЕС.

Для оцінки часу утворення наскрізної тріщини в структурі матеріалу з ушкодженою поверхнею, у роботі запропоновано удосконалений метод, на основі застосування фрактально-кластерної теорії.

Проведення оцінки часу утворення наскрізної тріщини в оболонці ТВЕЛ, з нанодисперсною об'ємною фрактальною структурою, було запропоновано проводити

на основі фрактально-кластерної теорії, при цьому необхідно враховувати те, що перевищення встановленого порогу концентрації небезпечних газів (гелію) і їхніх сумішей, відбувається при формуванні в порах структури матеріалу, газових кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію.

Отже, швидкість і швидкодія утворення наскрізних тріщин у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, буде визначатися швидкістю формування зазначених газових кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію.

Виходячи із цього, для оцінки швидкості і швидкодії утворення наскрізної тріщини, може бути запропоновано, удосконалений аналітичний вираз, що забезпечує розрахунок часу формування (росту) фрактального кластера з молекул гелію.

Поряд з розумінням фізичної природи формування кластерів, важливе значення для аналізу цього процесу, має оцінка часу, за який гелієвий кластер може сформуватися.

На основі таких оцінок, можна зробити висновок про можливість утворення кластера з фрактальною структурою в конкретній фізичній ситуації при наявності набору конкуруючих процесів.

Розглянемо фізичний процес, коли в початковий момент часу, розглянута речовина перебуває у вигляді газу в нескінченному середовищі (рис. 2.3).

Далі із цього газу формуються частки певних розмірів. Звернемо увагу на стадію, коли ці частки поєднуються в кластер. Процес закінчується, коли кластер стає нескінченно великим. Наприклад, якщо має місце кластер-кластерна агрегація, то процес закінчується, якщо окремі кластери стають настільки великими та розрідженими, що торкаються один одного і займають весь об'єм структури матеріалу.

Таким чином, середня щільність матеріалу в кластері дорівнює середній щільності матеріалу в об'ємі, що у процесі формування кластера не змінюється. Тим самим кластери поєднуються в один кластер нескінченних розмірів (рис. 2.3).

Відзначимо, що дана стадія процесу є більш повільною у порівнянні з першою стадією – утворенням макрочасток з газу (гелію).

Дійсно, формування кластера з макрочасток, визначається рухом макрочасток

у середовищі, тоді як утворення макрочасток з газу – рухом атомів або молекул речовини.

Тим самим, час утворення кластера при релаксації газу, визначається швидкістю другої фази – утворенням кластера з макрочасток. Таким чином, розглянутий процес об'єднання макрочасток у кластер моделює процес релаксації газу з утворенням кластерів.

При розрахунку часу формування кластерів, вводиться припущення, що частки роблять дифузійний рух у середовищі, і для механізму утворення кластера, скористаємося фізичною моделлю, показаною на (рис. 2.3).

Як видно, з (рис. 2.3), кластер у структурі матеріалу росте в міру прилипання до нього окремих часток або коли частки поєднуються в кластери, таким чином має місце кластер-кластерна агрегація. У результаті виникає багато кластерів, які з'єднуються один з одним, так, що згодом характерний розмір кластерів росте, а число їх падає.

Для спрощення математичних виразів припустимо, що частки сферичні і мають той самий розмір, крім того, будемо вважати, що зіткнення часток або кластерів призводить до їх об'єднання.

Варто враховувати дифузійний рух часток у середовищі, також дифузійний рух кластерів і їх падіння в середовищі під дією сили ваги. При цьому для простоти будемо вважати, що опір середовища кластеру таке ж, як для сферичної частки радіусом, що відповідає розміру кластера.

У рамках цих припущень знайдемо кількісні характеристики процесу, коли кластер росте за рахунок прилипання до нього окремих часток.

Число часток у кластері задовольняє виразу (2.70):

$$dn/dt = v_0 + v_1, \quad (2.70)$$

де $v_0 = 4\pi\delta RN$ – частота прилипання до кластера часток, що роблять броунівський рух;

D – коефіцієнт дифузії часток у середовищі;

N – їх число в одиниці об'єму;

v_1 – частота захвату кластером часток у результаті його падіння у поле сил ваги;

Нехай радіус кластера R і число часток у ньому n відповідно зв'язані співвідношенням (2.71):

$$n = (R / r_0)^{d_f}, \quad (2.71)$$

де n – число часток у кластері;

R – радіус кластера;

r_0 – радіус окремої частки;

d_f – фрактальна розмірність кластера.

Використовуючи формулу Стокса, що описує коефіцієнт дифузії у випадку, коли розмір часток перевищує довжину пробігу молекул у середовищі можна одержати вираз (2.72):

$$v_0 = k_0 N n^{1/d_f}, \quad (2.72)$$

де v_0 – частота прилипання до кластера часток, що роблять броунівський рух;

$k_0 = 2T / 3\eta$ – константа швидкості, яка не залежить від матеріалу й розміру часток. Для повітря при $T = 300 K$, ця величина дорівнює $1,5 \dots 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$;

N – число часток в одиниці об'єму;

n – число часток у кластері.

Частота захвату часток падаючим кластером, визначається по формулі (2.73):

$$v_1 = \pi R^2 v N, \quad (2.73)$$

де ν_1 – частота захвату кластером часток;

$$\nu = \frac{2\rho r_0^2 g}{9\eta} - \text{швидкість падіння кластера під дією сили ваги};$$

ρ – різниця щільностей матеріалу часток і середовища при моделюванні кластера круглою часткою.

При цьому, вводиться умова, що пори в кластері зайняті матеріалом середовища, у якому він росте. Тоді з урахуванням цього, перетворимо вираз (2.73), до наступного виду:

$$\nu_1 = k_1 N n^{\frac{d_f+1}{d_f}} \quad (2.74)$$

де $k_1 = \frac{2\pi\rho g r_0^4}{9\eta}$ – коефіцієнт швидкість падіння кластера під дією сили ваги.

Підставляючи значення виражень (2.73) і (2.74) у рівняння (2.70), отримаємо аналітичний вираз (2.75) для часу росту кластера наскрізної тріщини:

$$t = \frac{1}{N} \int \frac{dn}{k_0 n^{1/d_f} + k_1 n^{1+1/d_f}}. \quad (2.75)$$

Враховуючи, що $k_0 > k_1$, одержуємо, що цей інтеграл в основному сходиться при $n \gg k_0/k_1 > 1$, так що в якості нижньої й верхньої меж в (2.75) можна підставити відповідно нуль і нескінченність.

Обчислюючи інтеграл у припущенні, що число часток в утвореному кластері n значно перевищує відношення k_0/k_1 , одержуємо час формування фрактальної структури матеріалу з ушкодженою поверхнею (2.76):

$$t = \frac{\pi}{Nk_0^{1/d_f} k_1^{1-1/d_f} \sin\left(\frac{n}{d_f}\right)}. \quad (2.76)$$

У міру укрупнення кластера, середня густина речовини в ньому знижується.

Коли кластери досягнуть характерних розмірів \bar{R} , при яких середня густина речовини в ньому стане порядку середньої густини речовини в об'ємі, вони будуть займати весь об'єм.

Тоді можна одержати наступну оцінку для часу формування структури матеріалу з ушкодженою поверхнею (2.77):

$$t \approx \frac{\tilde{n}_0}{N_0 k_0 a_0} \approx \frac{1}{N_0 k_0 a_0} \left(\frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right)^{d_f / (3d_f)}, \quad (2.77)$$

де ρ_0 – масова щільність матеріалу часток (наприклад, молекули гелію);

$\bar{\rho}$ – середня масова густина речовини в об'ємі;

\tilde{n}_0 – середнє число часток у кластері, якщо кластери заповнюють весь об'єм.

Розглянуті аналітичні вирази (2.76) і (2.77), моделі формування кластера, відповідають припущенню, що ймовірність злипання часток (молекул гелію) при їх зіткненні не мала, так що частки поєднуються після зіткнення. Можливо, це відбувається після багатьох зіткнень, тобто ймовірність злипання мала, але частки з'єднуються до того, як розійтися на більші відстані в результаті дифузійного руху. Таке припущення відповідає моделі формування кластера структури матеріалу з ушкодженою поверхнею.

Варто відзначити, що в реальній ситуації, кластери можуть бути отримані із часток невеликих розмірів при високій концентрації матеріалу в середовищі, для утворення наскрізної тріщини. Однак, якщо час формування кластера досить значний, то процеси, пов'язані з віднесенням матеріалу з досліджуваного об'єму, не дадуть сформуватися кластеру, тобто не буде утворена наскрізна тріщина.

Таким чином, для проведення оцінки критерію стану об'ємної фрактальної структури, при розрахунку часу формування (швидкості наростання) кластер-кластерної агрегації, необхідно враховувати загальну фрактальну розмірність d_f^Σ зовнішньої та внутрішньої поверхні матеріалу, що, за результатами даних отриманих при проведенні експерименту із використанням скін-ефекту, визначається виразом (2.78):

$$d_f^\Sigma = 2 \ln \frac{R_{el}}{\omega} \quad (2.78)$$

де $R_{el} = R_{ext} + R_{int}$ – загальний електричний опір провідячого матеріалу;

R_{ext} – електричний опір на зовнішній поверхні провідячого матеріалу;

R_{int} – електричний опір на внутрішній поверхні провідячого матеріалу;

ω – резонансна частота коливань часток, що дозволяє записати співвідношення (8) у вигляді виразу (2.79):

$$t \approx \frac{n_0^{\frac{3}{2} - \ln \frac{\omega}{R_{el}}}}{N_0 k_0} \quad (2.79)$$

У таблиці 2.1, представлені дані обчислювального експерименту, розраховані по формулі (2.77), для значень часу формування кластера і відповідні йому значення радіуса часток r і первісної щільності ρ матеріалу.

На (рис. 2.4), показані залежності часу росту кластера t від радіуса часток r і первісної щільності ρ структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Із графіків (рис. 2.4), випливає, що чим більше радіус частки r і більше первісна щільність ρ матеріалу, тим швидше формується й росте кластер наскрізної тріщини у фрактальній структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Таблиця 2.1

Дані для значень часу формування кластера наскрізної тріщини

Первісна щільність ρ (кг/м ³)	Час росту кластера фрактальної структури		
	t (у секундах)		
	r (у нанометрах)		
	1	2	3
0,1	2,806975	0,975348	0,525552
0,3	0,935658	0,325116	0,175184
1,0	0,280698	0,097535	0,052555

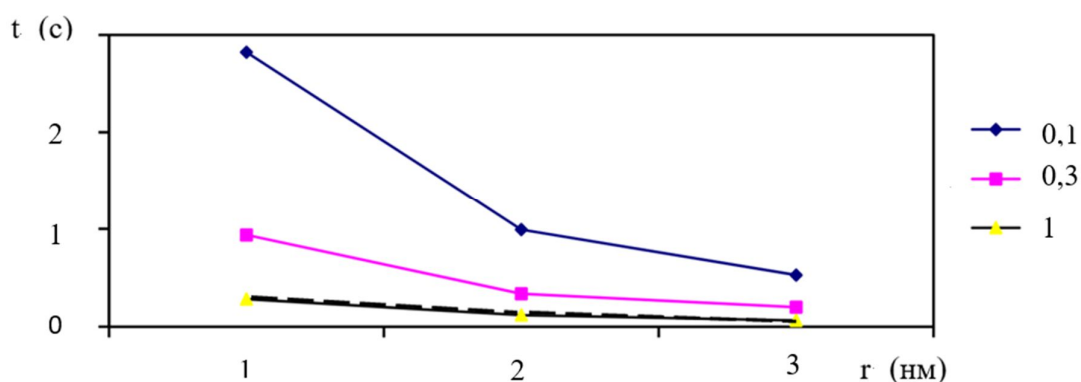


Рис. 2.4. Залежність часу росту кластера t від радіуса часток r та первісної щільності ρ матеріалу

На підставі статистичного моделювання і проведених розрахунків було встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах, може бути використано як оцінка критерію стану ушкодженої поверхні матеріалу в залежності від концентрації часток (молекул гелію) у кластері наскрізної тріщини, і може коливатися в межах від мілісекунд до одиниць секунд, що підтверджується результатами обчислювального експерименту.

Таким чином, проаналізовані підходи з оцінювання критерію стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею та запропоновано, в якості критерію оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, використати час формування та росту кластера наскрізної тріщини в об'ємі фрактальної структури матеріалу. Визначено, що в якості кількісної величини, для оцінки стану структури матеріалу, обрана загальна фрактальна розмірність.

Встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах, залежить від концентрації часток (молекул гелію) у кластері та коливається в межах від мільйонів секунд до одиниць секунд.

Висновки до другого розділу

Запропоновано новий підхід для вивчення структурно-фазових змін у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, викликаних ушкоджуючими дефектами, на основі апарату фрактальної геометрії, який враховує фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ.

Показано перевагу використання методу фрактальної геометрії для побудови фрактальних поверхонь оболонки ТВЕЛ перед класичними моделями негладких форм.

Побудовано фізичну модель оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра, яка дозволяє досліджувати фрактальну структуру оболонки та визначити реальну площу поверхні оболонки по всій висоті ТВЕЛ, яка знаходиться в ступеневій залежності від фрактальної розмірності.

Удосконалено аналітичні вирази моделі ушкодженості та моделі деформації оболонки ТВЕЛ, що дозволяє при проведенні післяреакторних досліджень підвищити безпеку експлуатації реактора на швидких нейтронах за рахунок:

- виявлення розгерметизації ТВЕЛ на більш ранній стадії ушкодження структури матеріалу оболонки;
- ефективного визначення моменту перевищення нормативних меж з розгерметизації ТВЕЛ;
- підвищення точності локалізації дефектних ТВЕЛ.

Підтверджено адекватність отриманої вдосконаленої моделі ушкодження оболонки, на основі проведення обчислювального експерименту на фізичній моделі оболонки з використанням скін-ефекту, який підтвердив відповідними розрахунками, результати теоретичних досліджень.

Визначено, що в якості кількісної величини, для оцінки стану структури матеріалу, обрано загальну фрактальну розмірність.

Теоретично обґрунтовано вибір, використання параметра фрактальної розмірності, як ефективного критерію оцінки герметичності та розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Проаналізовано підходи до оцінювання критерію стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею.

Запропоновано, в якості критерію оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, використовувати час формування та зростання кластера наскрізної тріщини в об'ємі фрактальної структури матеріалу.

Встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах залежить від концентрації частинок (молекул гелію) у кластері і коливається в межах від мілісекунд до одиниць секунд.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ

У розділі 3 показано проведення та обробка результатів експериментальних досліджень на фізичній моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту.

Показано, що у проведеному експерименті з проходженням електричного струму та фіксованою щільністю електромагнітного випромінювання в порожнині циліндроподібної трубки просторовий розподіл електромагнітного струму еволюціонує з частотою ω . Саме ця еволюція дозволяє полю фіксувати фрактальну розмірність системи з використанням скін-ефекту.

В результаті проведеного експерименту, показано, що реальні фрактальні збільшення геометричних параметрів (площа, висота) ТВЕЛ, знаходяться в ступеневій залежності від величини фрактальної розмірності, і відповідають її певному значенню на аксіальних сегментах пошкодженої поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти електричного опору (потужності) під час використання скін-ефекту.

3.1 Порядок проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту

Для проведення експериментальних досліджень, в якості фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, була обрана циліндроподібна залізна трубка (рис. 3.1) з наступними геометричними параметрами: довжина – 3837 мм; зовнішній діаметр – 9,15 мм; внутрішній діаметр – 7,73 мм; товщина стінки – 0,69 мм.

По висоті трубки, на 10 ділянках поверхні оболонки, за допомогою методу лазерного свердління, були нанесені ушкоджуючі дефекти різного розміру від 3 мкм (розмір мікропори) до 50 мкм (розмір макротріщини), а також дефект типу наскрізна

тріщина розміром більше 50 мкм (55, 70, 80, 100, 120 мкм).



Рис 3.1. Вигляд експериментального зразка трубки – імітатора фізичної моделі ТВЕЛ з різними ушкоджуючими дефектами на поверхні оболонки

Для проведення вимірювань із застосуванням скін-ефекту було розроблено лабораторний макет експериментальної установки, що дозволяє змоделювати скін-ефект.

До складу лабораторної установки входить наступне обладнання та прилади (рис. 3.2): генератор сигналів функціональний ГСФ-2; осцилограф–мультиметр С1-112А; набір алюмінієвих та залізних трубок; магазин ємностей; сполучні дроти. Генератор електричних коливань, згідно з (рис. 3.2) включає: L – соленоїд, С1 і С2 – конденсатори однакової ємності (перебувають у магазині ємностей), DA1 – операційний підсилювач, R1 і R2 – резистори.

При подачі живлення на мікросхему на виводах соленоїда з'являється гармонійний сигнал, а на виході підсилювача точка А на (рис. 3.2) – сигнал, близький до прямокутного. За наявності цих сигналів за допомогою осцилографа вимірюється частота сигналу на виході підсилювача.

Якщо у соленоїд вставити досліджуваний зразок трубки – фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, то індуктивність коливального контуру зміниться. За відповідною зміною частоти визначається електричний опір та потужність провідника – зразка трубки фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, а потім обробляється у обчислювальному пристрої за допомогою обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів (рис. 3.2).

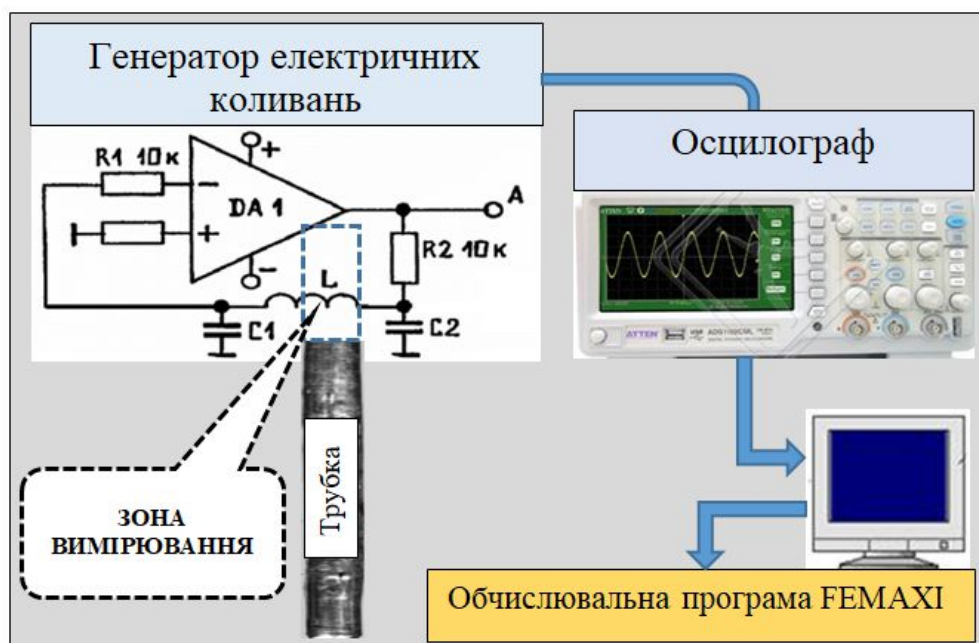


Рис. 3.2. Структурна схема складу обладнання лабораторної установки для проведення експерименту з використанням скін-ефекту

Для вимірювання, залежності величини фрактальної розмірності від прикладеної частоти та електричного опору (потужності) проводилися такі етапи експерименту (рис. 3.3):

Визначення місцезнаходження ушкоджуючого дефекту на поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ на вибраних аксіальних сегментах №1÷10:

- визначення залежності величини електричного опору (потужності) від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- заповнення таблиці з даними результату експерименту визначення залежності величини електричного опору (потужності) від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- побудова графіків за даними таблиці за результатами експерименту визначення залежності величини електричного опору від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- побудова графіків за даними таблиці за результатами експерименту визначення залежності величини електричної потужності від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

– визначення величини фрактальної розмірності шляхом визначення тангенса кута нахилу графіка залежності R/R_0 від ω/ω_0 ;

– визначення величини фрактальної розмірності шляхом визначення тангенса кута нахилу графіка залежності P/P_0 від ω/ω_0 ;

Якщо при визначенні величини фрактальної розмірності вона перевищує топологічну розмірність, тобто $d_f > 1$ (для R/R_0 від ω/ω_0) або $d_f > 2$ (для P/P_0 від ω/ω_0), тоді можна стверджувати, що на даному аксіальному сегменті зразка ТВЕЛ, має місце ушкоджуючий дефект на поверхні оболонки зразка ТВЕЛ.

Для виконання етапів експерименту було розроблено наступну послідовність ходу експерименту, як показано на (рис. 3.3).

Розглянемо послідовність виконання етапів експерименту. Для проведення експерименту модель ТВЕЛ у вигляді сталеві трубки довжиною 3880 мм була розділена на 10 аксіальних сегментів, в центральній точці кожного з них, на поверхні оболонки були задані штучно створені, різні типи дефектів у вигляді вм'ятин, опуклостей, подряпин, сколів, пор, тріщин та розмірів від $3 \div 50$ мкм, а також в оболонці, за допомогою лазерного променя, була зроблена наскрізна тріщина розміром понад 50 мкм.

Як було визначено в ході теоретичних досліджень, кожному розміру дефекту відповідає певне значення фрактальної розмірності, для якої на відміну від геометричної (топологічної) розмірності ($d_T = 2$) завжди дотримується нерівність: $d_f \neq 2$.

Тоді для визначення місцезнаходження дефекту визначимо всі аксіальні сегменти, в яких $d_f \neq 2$.

Для цього, за допомогою лабораторної установки, показаної на (рис. 3.2), яка імітує (моделює) скін-ефект, було досліджено кожен аксіальний сегмент зразка у вигляді порожнього циліндра та отримано дані залежності електричного опору (потужності) від прикладеної частоти на кожному аксіальному сегменті, які занесені до таблиць 3.1 та 3.2.

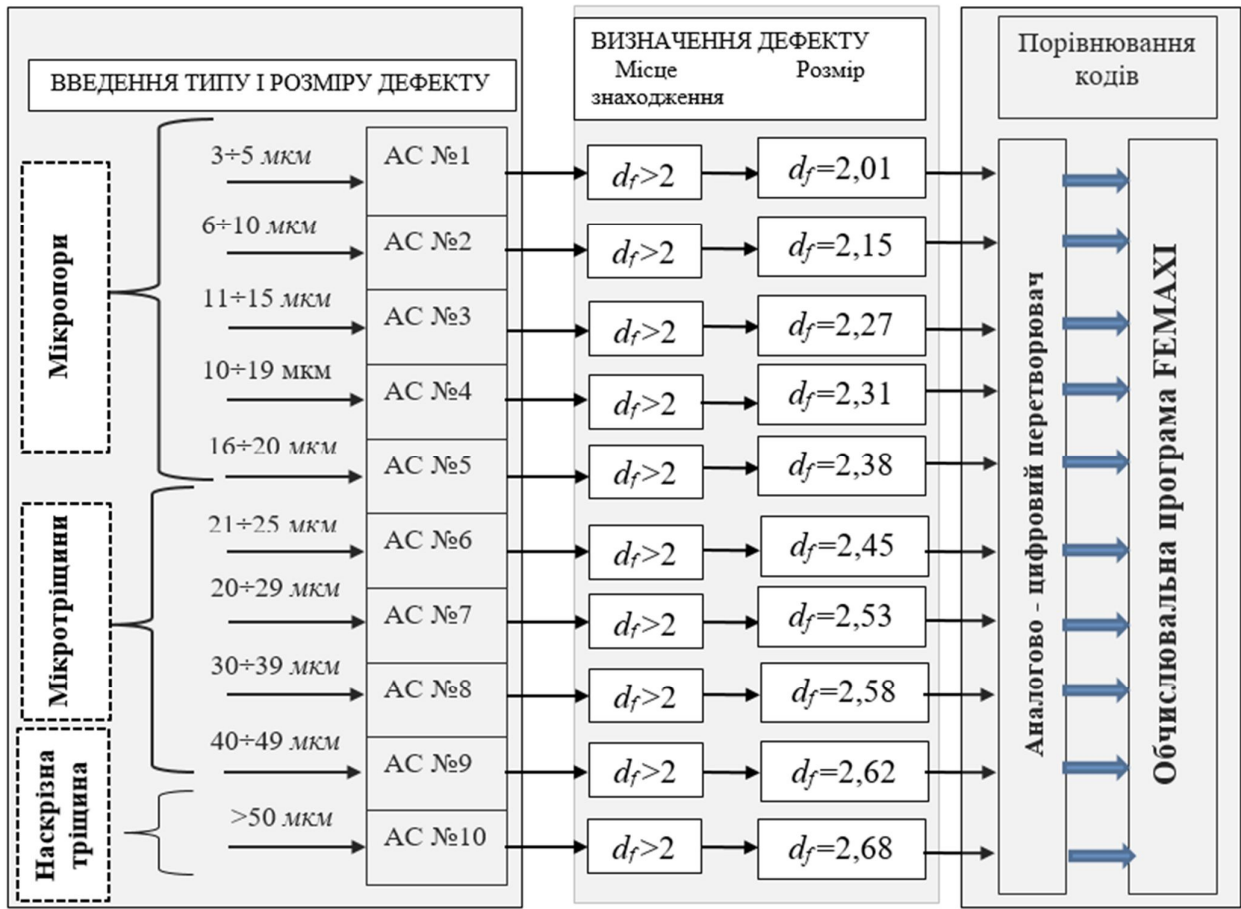


Рис. 3.3. Послідовність виконання етапів експерименту

За експериментальними даними з таблиці 3.1 та 3.2, були складені графіки залежності електричного опору (потужності) від прикладеної частоти на кожному аксіальному сегменті.

Далі було визначено значення величин фрактальної розмірності на кожному аксіальному сегменті по довжині ТВЕЛ шляхом вимірювання кутового коефіцієнта (тангенс кута нахилу) на графіку $\ln R/R_0$ та $\ln P/P_0$, як функції від $\ln \omega/\omega_0$.

Таким чином, по тангенсу кута нахилу, отримали значення величин фрактальної розмірності на кожному аксіальному сегменті №1÷10 для залежності $\ln R/R_0$ як функції від $\ln \omega/\omega_0$ (графік 1, рис. 3.4) і для залежності $\ln P/P_0$, як функції від $\ln \omega/\omega_0$ (графік 1, рис. 3.5).

Для тих аксіальних сегментів зразка порожнистого циліндра, де $d_f \neq 2$ означає наявність на поверхні оболонки ушкоджуючого дефекту.

Для перевірки адекватності отриманих результатів у ході експериментальних досліджень було використано відому обчислювальну програму FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів (рис. 3.3).

Проведено порівняння значень фрактальної розмірності $d_f > 2$, отриманих під час експерименту з базою даних обчислювальної програми FEMAXI V

Важливо, що висновок, отриманий шляхом розрахунків за програмою FEMAXI V, підтвердив адекватність результатів експерименту. Розбіжність у результатах порівняння становила трохи більше 0,5%. Це практичне застосування. Далі, для визначення типу та розміру дефекту, за допомогою відомої обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів, проводиться порівняння зі значеннями фрактальної розмірності $d_f > 2$, які отримані в ході експерименту.

В результаті порівняння розрахунків та вимірювань, було виявлено місце розташування та розміри дефектів на кожному аксіальному сегменті за довжиною експериментального зразка, задані як початкові умови для проведення експерименту та отримані в результаті обчислень за допомогою обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259].

У джерелах [258 – 259] вказана математична модель, закладена в ПЗ FEMAXI, яка призначена для аналізу зміни властивостей твела реактора типу ВВЕР–1000 в режимі змінного навантаження, оскільки використовує метод кінцевих елементів, що дозволяє коректно оцінювати зміни в стані ТВЕЛ не лише в стаціонарних, але і в перехідних режимах, а також застосовує алгоритм спільного рішення рівнянь теплопровідності та механічної деформації для обчислення еквівалентних деформації повзучості та напруги залежно від режиму навантаження. Синтез математичної моделі, закладеної в ПЗ FEMAXI, і моделі оцінки довговічності оболонки твела на основі енергетичного варіанту теорії повзучості, дозволив уперше описати зміну властивостей ТВЕЛ РУ з ВВЕР–1000 залежно від режиму змінного вантаження. При використанні запропоновану математичну модель зміни властивостей твела РУ з ВВЕР–1000 в різних експлуатаційних режимах, необхідно виконати оцінку довговічності оболонки твела в змінному режимі вантаження та провести аналіз отриманих результатів.

Результати експерименту підтвердили наявність ушкоджуючого дефекту типу наскрізної тріщини на аксіальному сегменті № 10 з розміром більше 50 мкм, якому відповідає фрактальна розмірність $d_f = 2,68$. Важливо, що висновок, отриманий шляхом розрахунків за програмою FEMAXI V, підтвердив результат експерименту.

3.2 Дослідження та обговорення результатів експериментальних досліджень зразка трубки – імітатора фізичної моделі ТВЕЛ з різними ушкоджуючими дефектами на поверхні оболонки

У ході експерименту було розглянуто якісну картину просторового розподілу електромагнітного поля ззовні та всередині структури матеріалу зовнішньої S_f^{ext} та внутрішньої S_f^{int} поверхонь оболонки порожнистого циліндра.

Показано, що в експерименті з фіксованою щільністю електромагнітного випромінювання вона характеризується певною специфікою розподілу величин електричного опору та потужності (R_Σ , P_Σ), при проходженні електричного струму в скін-шарі з певною частотою ω .

При цьому розсіювання енергії на поверхні наночастинок (залежно від частоти супроводжується: ефектами дисипації у зовнішнє середовище; поглинанням P_Σ в порожнині структури (резонансне поглинання енергії)).

Необхідно відзначити, що характер розподілу загального електричного опору R_Σ для фрактальної структури в скін-шарі також залежить від прикладеної частоти ω [252].

На (рис. 3.3), показані графіки залежності повного опору циліндра $R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$ від частоти для різних значень фрактальної розмірності (табл. 3.1) поверхні циліндра в подвійному логарифмічному масштабі.

В ході експерименту було введено припущення, що зовнішня та внутрішня поверхні оболонки ТВЕЛ, мають однакову фрактальну розмірність.

Пряма 1 на графіці (рис. 3.3). відповідає гладкій геометричній поверхні з фрактальною розмірністю $d_{hf} = 1$ і описує класичну залежність $R \propto \sqrt{\omega}$.

Зі збільшенням фрактальної розмірності d_{h_f} , кут нахилу прямих 2, 3, 4, 5 на графіці (рис. 3.3), зростає.

На (рис. 3.4) показані графіки залежності повної виділеної потужності на поверхнях порожнистого циліндра P_Σ від частоти ω , для різних значень фрактальної розмірності d_{S_f} (табл. 3.2) площі поверхні циліндра у подвійному логарифмічному масштабі.

Передбачається, що зовнішня та внутрішня поверхні оболонки ТВЕЛ, мають однакову фрактальну розмірність площі загальної поверхні всього об'єму матеріалу,

що дорівнює $d_{S_f} = \left(d_{S_f^{ext}} + d_{S_f^{int}} \right) / 2$. Кутовий коефіцієнт прямих згідно (41) та (42)

дорівнює $\left(d_{S_f} - 3 \right) / 2 - 3) / 2$.

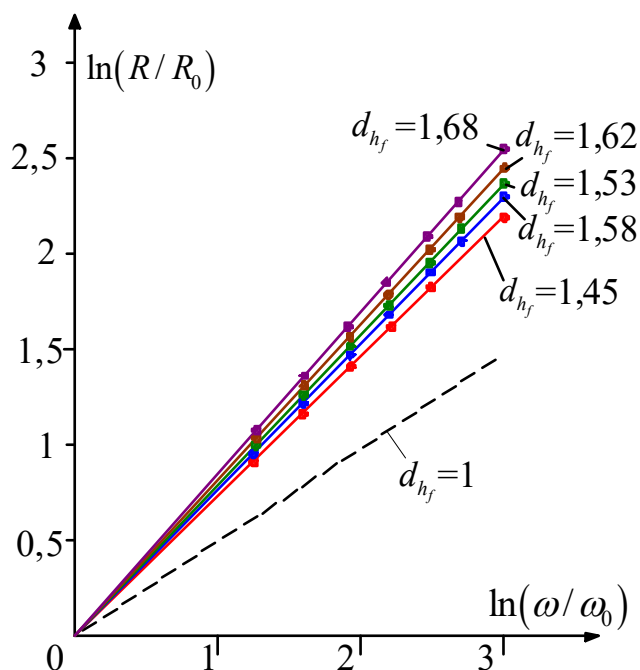


Рис. 3.3. Графіки зміни фрактальної розмірності на площі поверхні порожнистого циліндра в залежності від повного опору ($R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$) та частоти ω

Результати вимірювань фрактальної розмірності на аксіальних сегментах поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти та

електричного опору ($\nu_0 = 0,5$ ГГц)

Таблиця 3.1

Параметри експерименту		Аксіальний сегмент z									
		1		2		3		4		5	
$\frac{\omega}{\omega_0}$	$\ln \frac{\omega}{\omega_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
3	1,10	2,22	0,80	2,32	0,84	2,38	0,87	2,44	0,89	2,51	0,92
5	1,61	3,22	1,17	3,42	1,23	3,56	1,27	3,67	1,30	3,86	1,35
7	1,95	4,10	1,41	4,44	1,49	4,66	1,54	4,85	1,58	5,16	1,64
10	2,30	5,31	1,67	5,81	1,76	6,17	1,82	6,42	1,86	6,89	1,93
15	2,71	7,09	1,96	7,92	2,07	8,50	2,14	9,03	2,20	9,78	2,28
20	3,00	8,84	2,18	9,97	2,30	10,70	2,37	11,36	2,43	12,43	2,52
Фрактальна розмірність		$d_{h_f} = 1,45$		$d_{h_f} = 1,53$		$d_{h_f} = 1,58$		$d_{h_f} = 1,62$		$d_{h_f} = 1,68$	

Пряма 1 на графіку (рис. 3.4) відповідає гладкій геометричній поверхні з розмірністю $d_{S_f} = 2$ та описує класичну залежність $P \sim 1/\sqrt{\omega}$. Зі збільшенням фрактальної розмірності, кут нахилу прямих (2, 3, 4, 5), як показано на графіку (рис. 3.4), зменшується.

Таким чином, за графіками на (рис. 3.3 та 3.4), які побудовані за експериментальними даними (табл. 3.1 та 3.2), можна спостерігати динаміку процесу ушкодження поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ, у зонах вимірюваних аксіальних сегментів ($z_1 \div z_5$). Отримано, що при максимальному подовженні ТВЕЛ відбувається зміна величини фрактальної розмірності d_f від 1,45 до 1,68.

Як видно із графіка (рис. 3.5), максимальна ступінь ушкодження зовнішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, спостерігається в активному сегменті z_5 по висоті ТВЕЛ від 2,1 до 2,6 м, при цьому величина фрактальної розмірності $d_f = 1,68$.

Отже, в якості критерію розгерметизації для даного ТВЕЛ, при контролі герметичності оболонки, повинна виконуватися така умова:

- при $1,45 < d_f \leq 1,66$ – оболонка ТВЕЛ ушкоджена, але герметична;
- при $d_f \geq 1,68$ – оболонка ТВЕЛ розгерметизована.

Також отримано, що при максимальному подовженні ТВЕЛ відбувається зміна

величини фрактальної розмірності d_{S_f} площі внутрішньої поверхні від 2,45 до 2,68.

Як видно із графіка (рис. 3.6), максимальна ступінь ушкодженості внутрішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, спостерігається в активному сегменті z_5 по висоті ТВЕЛ від 2,1 до 2,6 м, величина фрактальної площі внутрішньої поверхні $d_{S_f} = 2,68$.

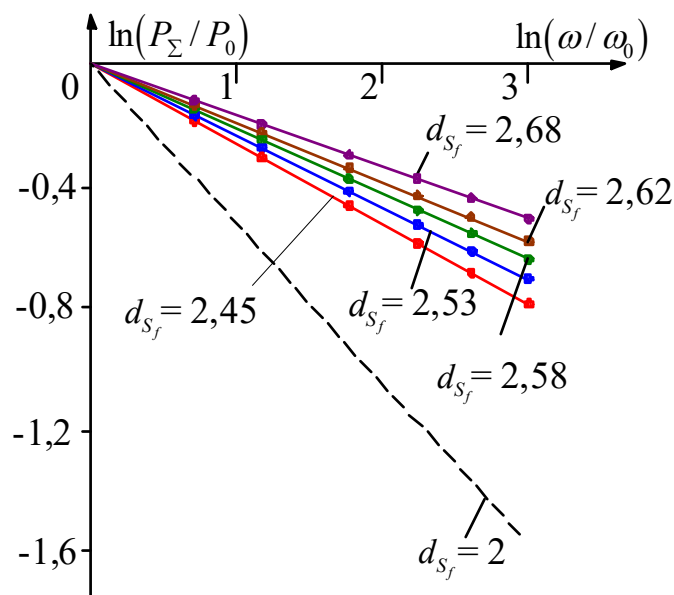


Рис. 3.4 Графіки зміни фрактальної розмірності на площі поверхні порожнистого циліндра в залежності від повної виділяємої потужності

$$(P_\Sigma = P_{ext} + P_{int}) \text{ та частоти } \omega$$

Результати вимірювань фрактальної розмірності на аксіальних сегментах поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти та потужності (початкова частота: $\nu_0 = 0,5$ ГГц)

Таблиця 3.2

Параметри експерименту		Аксіальний сегмент z									
		1		2		3		4		5	
$\frac{\omega}{\omega_0}$	$\ln \frac{\omega}{\omega_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$
1	0,00	1,00	-0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
3	-1,10	0,73	-0,30	0,77	-0,25	0,79	-0,23	0,81	-0,21	0,48	-0,17
5	-1,61	0,64	-0,44	0,68	-0,37	0,71	-0,33	0,73	-0,31	0,34	-0,25
7	-1,95	0,58	-0,53	0,63	-0,45	0,66	-0,41	0,69	-0,37	0,27	-0,31
10	-2,30	0,53	-0,63	0,58	-0,54	0,61	-0,48	0,64	-0,43	0,21	0,36
15	-2,71	0,47	-0,74	0,52	-0,63	0,56	-0,56	0,59	-0,51	0,16	0,43
20	-3,00	0,43	-0,82	0,49	-0,70	0,53	-0,63	0,56	-0,57	0,13	0,48
Фрактальна розмірність		$d_{S_f} = 2,45$		$d_{S_f} = 2,53$		$d_{S_f} = 2,58$		$d_{S_f} = 2,62$		$d_{S_f} = 2,68$	

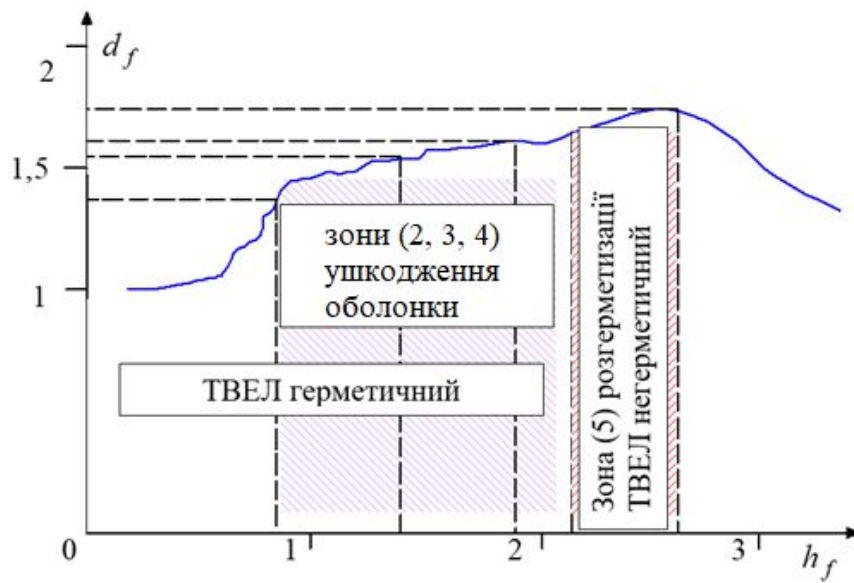


Рис. 3.5. Зміна величини фрактальної розмірності зовнішньої площі ушкодженої поверхні оболонки по всій довжині (висоті) ТВЕЛ

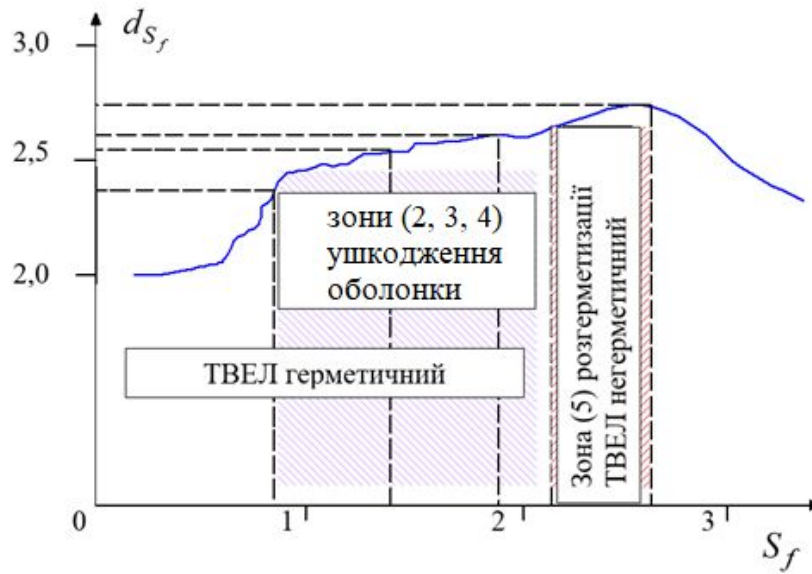


Рис. 3.6. Зміна величини фрактальної розмірності площі ушкодженої поверхні оболонки по всій довжині (висоті) ТВЕЛ

Отже, в якості критерія розгерметизації для даного ТВЕЛ, при контролі герметичності оболонки, повинна виконуватися така умова:

- при $2,45 < d_f \leq 2,66$ – оболонка ТВЕЛ ушкоджена, але герметична;
- при $d_f \geq 2,68$ – оболонка ТВЕЛ розгерметизована.

Висновки до третього розділу

Експериментально підтверджений неруйнівний метод оцінювання якості герметичності оболонки тепловиділяючого елемента для систем контролю герметичності оболонки, який дозволяє визначити місце розташування та розміри дефекту на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки, на основі визначення величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах за висотою тепловиділяючого елемента, шляхом визначення електричного опору та потужності від прикладеної частоти під час використання скін-ефекту

Експериментально обґрунтовано вибір величини фрактальної розмірності, для практичного використання, в якості ефективного критерію оцінки ступеня герметичності (розгерметизації) оболонки тепловиділяючого елемента.

Наведено послідовність вимірювань величини фрактальної розмірності, яка відповідає різним типам дефектів ушкодження за місцезнаходженням та розмірами, на поверхні оболонки по всій висоті тепловиділяючого елемента.

Експериментально отримано значення величини фрактальної розмірності, при яких оболонка тепловиділяючого елемента ушкоджена та деформована, але вважається герметичною, а також значення фрактальної розмірності, при яких однозначно вважається, що оболонка розгерметизована.

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.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ

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

У роботі, для реалізації та застосування фрактального методу контролю, на основі підходів та принципів розроблення методів кваліметрії, як показано в роботах [256-275], було розроблено варіант структурно-функціональної схеми удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, що включає наступні структурні елементи (рис. 4.1):

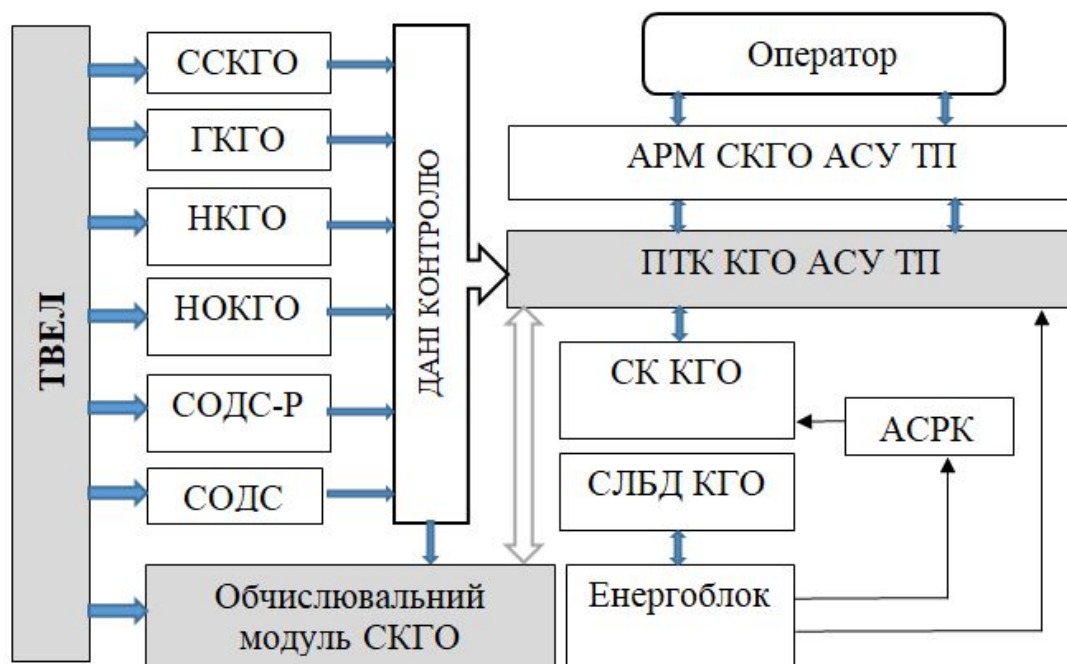


Рис. 4.1. Удосконалена структурно-функціональна система КГО ТВЕЛ

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

У розділі 1, був зроблений аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, який показав, що їх застосування, для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (наприклад, локальні неоднорідності, мікро- і макропори, різноманітні тріщини, осьова рихлість), відрізняється малою ефективністю, являє трудомісткий процес, який вимагає додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ. Крім того, досліджені методи контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, дозволяють візуально виявити тільки грубі зовнішні тріщини, великі шлакові включення, дрібні тріщини і неметалеві включення невидимі під шаром окалини. Виходячи з даних вищевикладених проблем, виникає доцільність розробки і застосування, принципово нових методів контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ з урахуванням сучасних наукових досягнень.

З позиції неруйнівного контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ, перспективним є використання теорії фракталів, фрактально-кластерного аналізу для розробки способів оцінювання якості поверхні оболонки з метою виявлення небажаних структурних змін (дефектів) поверхні і макроструктури матеріалу на всіх стадіях при експлуатації ТВЕЛ. Тому, в роботі запропоновано, для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки при її ушкодженні і руйнуванні, доцільність застосування розрахункового апарату, заснованого на методі теорії фракталів [60 – 74, 172, 179, 180, 192, 210, 211, 222, 236, 239, 253].

В якості основи, запропонованого методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ з використанням теорії фракталів, в роботі запропоновано використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки і кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь заповнення об'єму структури матеріалу оболонки при розгерметизації ТВЕЛ [180, 253].

Для оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, розглянемо опис базового методу фрактально-кластерної теорії (МФКТ). Необхідно розглянути

відмінні риси запропонованого методу МФКТ від існуючих методів контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Це перш за все можливість створення цілком реалізованої автоматизованої системи оперативного виявлення дефектів оболонки на різних стадіях при експлуатації ТВЕЛ, як підсистеми в складі СКГО АСУ ТП енергоблока АЕС. При цьому необхідно розробити і реалізувати алгоритм виконання запропонованого методу МФКТ у складі математичного забезпечення автоматизованої системи оперативного контролю (АСОК) якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Для реалізації даного методу, в роботі розроблено та запропоновано алгоритм автоматизованої системи оперативного контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, блок-схема алгоритму (рис. 4.2) дозволяє:

- отримати дані як про горизонтальні, так і вертикальні зміни в структурі матеріалу оболонки, а саме таких геометричних параметрів як: об'єм і площа поверхні, зовнішній і внутрішній діаметр, довжина і товщина оболонки;

- обробляти дані в режимі реального часу та розпізнавати мікроструктуру (локальні неоднорідності, мікро- і макропори і тріщини, наскрізні тріщини) і на основі цього, визначати координати локального зовнішнього і внутрішнього дефекту в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Алгоритм системи АСОК у складі системи АСУ ТП енергоблоку АЕС включає наступні етапи:

Етап №1: Вибір початкових умов;

Етап №2: Отримання даних, щодо зміни структури матеріалу оболонки;

Етап №3: Попередня обробка даних про структуру оболонки ТВЕЛ;

Етап №4: Визначення координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ, шляхом розрахунку величин фрактальної розмірності на аксіальних ділянках за висотою (довжиною) ТВЕЛ;

Етап №5: Фіксація координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ шляхом відбору величини фрактальної розмірності на аксіальному ділянці за висотою (довжиною) ТВЕЛ, що відповідає дефекту типу наскрізна тріщина;

Етап №6: Порівняння у базі даних, показників фрактальної розмірності

структури оболонки для еталонного герметичного та розгерметизованого ТВЕЛ;

Еман №7: Визначення місцезнаходження, типу та розміру дефекту в оболонці ТВЕЛ;

Еман №8: Подання інформації з підсистеми АСОК до системи АСУТП енергоблоку АЕС про місце та розміри поверхневого дефекту та його вплив на рівень розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, у розробленому та запропонованому алгоритмі застосування автоматизованого методу фрактального контролю системи КГО ТВЕЛ. Визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності для встановлення місцезнаходження, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти ТВЕЛ.

Також подання інформації з підсистеми АСОК до системи АСУ ТП енергоблоку АЕС на АРМ оператора-інженера АСУ, для оцінки ступеня герметичності або розгерметизації ТВЕЛ у складі ТВЗ, з метою вироблення рішення для керування режимами роботи ЯР АЕС. Для реалізації алгоритму розробленого фрактального методу, у роботі був запропонований програмний обчислювальний модуль підсистеми КГО для системи АСУТП енергоблоку АЕС.

Блок схема обчислювального модуля, для виконання алгоритму розробленого фрактального методу, щодо визначення показника фрактальної розмірності контуру дефекту матеріалу ТВЕЛ, показана на (рис. 4.3).

Дамо пояснення до основних блоків функціональної схеми обчислювального модуля для виконання алгоритму визначення показника фрактальної розмірності контуру дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ (рис. 4.3).

Для визначення координат місця розташування зовнішнього або внутрішнього дефекту, задається величина змінного інтервалу даних $[\alpha, \beta]$ у кожному аксіальному сегменті по висоті ТВЕЛ, в кілька разів меншого, ніж об'єм даних аналізованого часового ряду даних, який розбивається на рівні підінтервали, потім на кожному розбитті визначається сума різниць між максимальним і мінімальним значеннями даних в рамках кожного підінтервалу.



Рис. 4.2. Блок-схема алгоритму фрактального методу контролю системи КГО

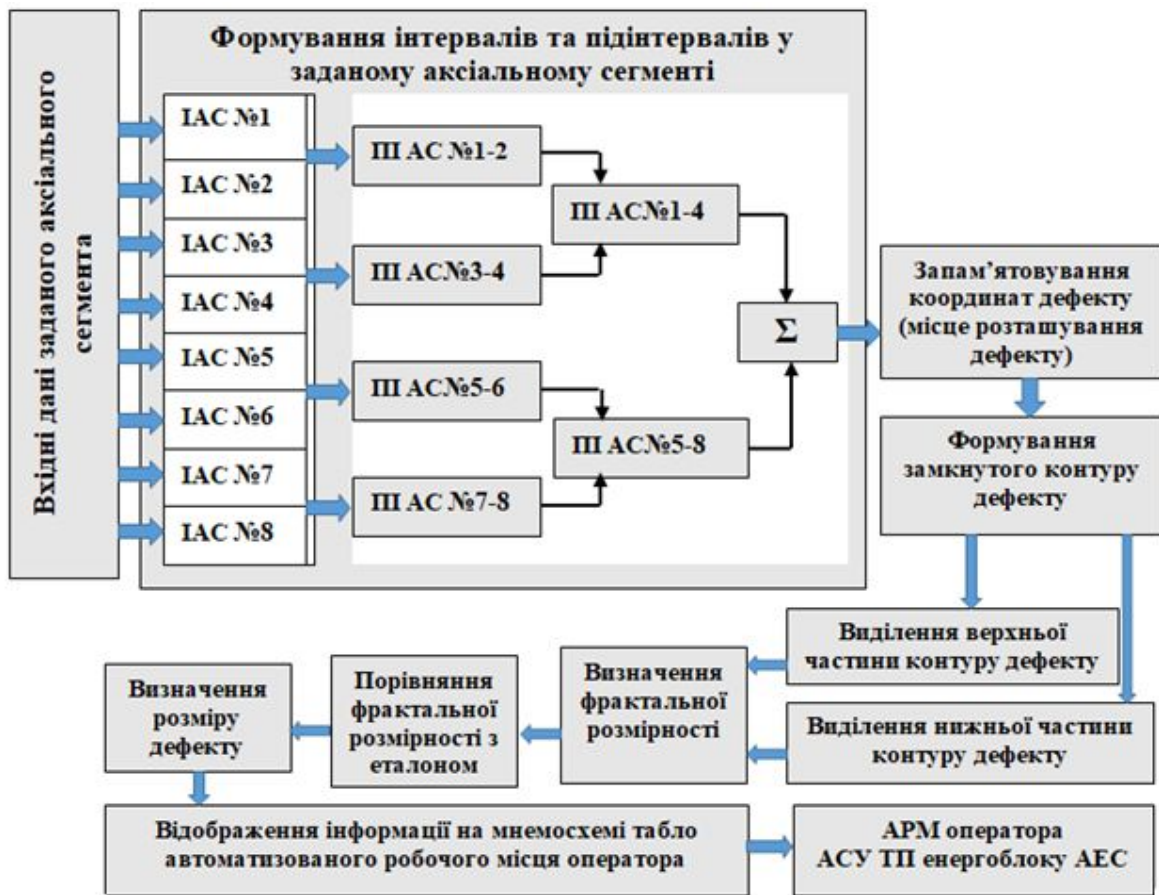


Рис. 4.3. Блок схема обчислювального модуля для виконання алгоритму визначення показника фрактальної розмірності контуру дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ

Сукупність отриманих координат по кожному підінтервалу, конкретизує контур поверхневого дефекту на кожному аксіальному сегменті по висоті ТВЕЛ

Розглянемо методику розрахунку фрактальної розмірності ушкоджуючого дефекту у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ. Спочатку, за сукупністю отриманих координат, формується контур ушкоджуючого дефекту з подальшим розбиттям його на складові частини (наприклад, дві частини – верхня і нижня), за даними для кожного аксіального сегмента по всій висоті ТВЕЛ, розраховується значення фрактальної розмірності за формулою (4.1):

$$d_{f_{AC}} = \mu_i + 1 \quad (4.1)$$

де $d_{f_{AC}}$ – фрактальна розмірність аксіального сегмента по висоті ТВЕЛ; μ_i – індекс варіації $i = 1, 2$.

Визначення показника фрактальної розмірності цілісного замкнутого контуру, виявленого ушкоджуючого дефекту поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, здійснюється за формулою (4.2) та (4.3):

$$d_{f_K} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 d_{f_{AC}} \quad (4.2)$$

$$d_{f_K} = \frac{1}{2} (d_{\mu_B} + d_{\mu_H}) \quad (4.3)$$

де d_{μ_B} – значення фрактальної розмірності для верхньої зламаної лінії замкнутого контуру аксіальних сегментів, виявленого ушкоджуючого поверхневого дефекту відповідно;

d_{μ_H} – значення фрактальної розмірності для нижньої зламаної лінії замкнутого контуру аксіальних сегментів, виявленого ушкоджуючого поверхневого дефекту відповідно.

Розглянемо конкретизацію типу ушкоджуючих поверхневих дефектів за значенням фрактальної розмірності, по еталонній шкалі дефектів, що включає види поверхневих ушкоджуючих дефектів, максимально допустимі геометричні розміри усунених дефектів і відповідні типам дефектів значення фрактальної розмірності контурів аксіальних сегментів. У разі якщо, фрактальна розмірність знову виявленого ушкоджуючого дефекту, перевищує фрактальну розмірність усунених дефектів ($d_{f_n} > 1$ або $d_{f_s} > 2$), робиться висновок про місцезнаходження та тип дефекту і його вплив на ступінь стану розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Однак, не змінюючи суті розглянутого способу оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, для оперативного виявлення ушкоджуючих поверхневих дефектів матеріалу оболонки на ранніх стадіях його експлуатації, необхідно істотно

підвищити швидкодію алгоритму визначення показників фрактальної розмірності контурів аксіальних сегментів виявлених дефектів.

Таким чином, у пропонованому модулі системи КГО, проводяться обчислювальні операції по оцінці якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, шляхом:

- визначення різниць між максимальними та мінімальними значеннями даних у підінтервалах аксіальних сегментах по висоті ТВЕЛ;

- розрахунку накопичених сум і виділення окремих складових контуру аксіальних сегментів для всієї висоті ТВЕЛ;

- поділу головного “поток” оброблюваної інформації (інформація по всьому контуру дефекту) на окремі потоки (інформація по складовим частинам контуру) і подальшу обробку проводити з використанням операції з окремими потоками даних (розпаралелювання).

Кінцевим результатом роботи обчислювального програмного модуля системи КГО, є визначення показника фрактальної розмірності контуру аксіального сегмента дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ і передачі цієї інформації у вигляді цифрового коду на автоматизоване місце оператора АРМ(о) АСУ ТП АЕС про виявлені дефекти і їх розташування на ТВЕЛ, при цьому можуть надаватися різним кольором на мнемосхемі і виділятися переборні і непереборні ушкоджуючі дефекти.

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

Для сполучення обчислювального модуля системи КГО з програмним обчислювальним комплексом ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, для виконання алгоритму визначення показника фрактальної розмірності контуру дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ, була удосконалена інформаційно-алгоритмічна схема АСУ ТП енергоблоку при функціонуванні модуля для виявлення дефектів ТВЕЛ у нештатних режимах роботи енергоблоку АЕС (рис. 4.4).

З (рис. 4.4) видно, що поєднання обчислювального модуля системи СКГО з ПТК АСУ ТП відбувається через модульний блок режимів позаштатних ситуацій для

подальшої роботи з модулями аварійних ознак та контролю інформації на достовірність. Розглянемо процес обробки даних про дефекти оболонки ТВЕЛ в модулі системи СКГО з використанням мікропроцесорної системи (МПС) АСУ ТП енергоблоку АЕС (рис. 4.5).

Дані про параметри оболонки ТВЕЛ надходять на обробку в арифметично-логічний пристрій (АЛП) системи МПС, де відбувається порівняння поточних значень фрактальних розмірностей з еталонними значеннями, які зчитуються з осередків пам'яті даних пам'яті даних.



Рис. 4.4. Удосконалення інформаційно-алгоритмічної схеми АСУ ТП енергоблоку при функціонуванні модуля виявлення дефектів ТВЕЛ в нештатних режимах роботи енергоблоку АЕС

При цьому в процесі обчислень, інформація перевіряється на достовірність і

наявність аварійних ознак. Результатом розрахунків, є видача сигналу на АРМ оператора, про стан ТВЕЛ, тобто якщо цифровий код характеристик фрактальної розмірності збігається, то ТВЕЛ – герметичний, в іншому випадку цифровий код буде вказувати на дефект ушкодження оболонки ТВЕЛ.

Необхідно відзначити, що числові експерименти з обчислення фрактальної розмірності і використання паралельних обчислювальних процедур в алгоритмі розрахунку показників фрактальної розмірності зламаних ліній контурів поверхневих дефектів оболонки дає скорочення часу виявлення дефекту на 30% в порівнянні з послідовним алгоритмом, в разі збільшення числа під інтервалів, час на обробку зменшується пропорційно їх збільшенню.

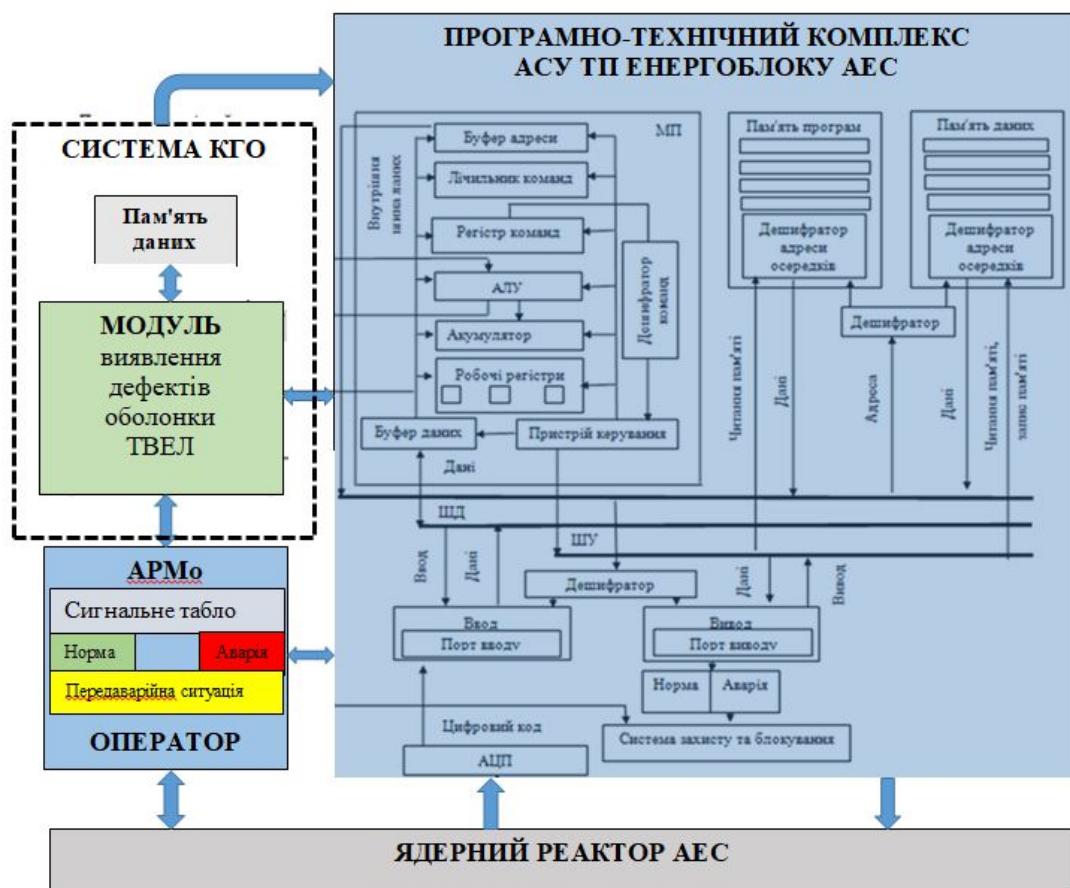


Рис. 4.5. Практичне використання модуля виявлення дефектів ТВЕЛ СКГО у програмно – технічному комплексі АСУ ТП енергоблоку АЕС

Зменшення витрат часу на оцінювання якості поверхні і макроструктури

матеріалу оболонки ТВЕЛ, сприяє вчасному прийняттю управлінських технологічних рішень і підвищує надійність і безпеку при експлуатації ЯР АЕС.

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

Для проведення метрологічної атестації методики вимірювань геометричних параметрів ТВЕЛ із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля системи КГО, була запропонована структурна схема обчислення геометричних параметрів ТВЕЛ, яка показана на (рис. 4.6).

Для знаходження місця дефекту в структурі матеріалу оболонки по всій довжині ТВЕЛ, програмні засоби (ПЗ) системи КГО, опитують вимірювальний модуль виявлення дефектів (ВМВД) СКГО на результати вимірювання фрактальної розмірності (ФР) на всіх аксіальних ділянках (АД) по довжині ТВЕЛ, та записує файл з результатами вимірювань ФР у заданих АД у відповідну комірку пам'яті ПЗ системи КГО. У процесі вимірювань, керуюча ЕОМ, автоматично обчислює значення висоти ТВЕЛ, як суму показань параметрів ФР по кожній АД довжини ТВЕЛ, шляхом порівняння еталонних значень параметрів ФР з поточними даними, отриманими в результаті розрахунків.

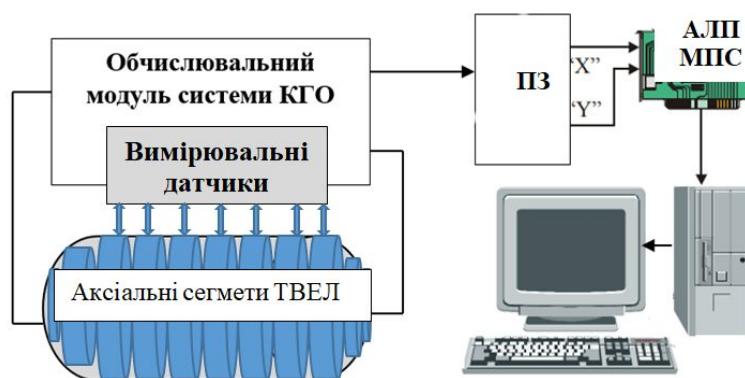


Рис. 4.6. Структурна схема проведення вимірювань діаметра оболонки ТВЕЛ по всій висоті

Ці операції проводяться в арифметико-логічному пристрої (АЛП) мікропроцесорної системи АСУ ТП енергоблоку АЕС, як показано на структурно-функціональній схемі (рис. 4.5).

Для визначення значення довжини ТВЕЛ, ЕОМ модуля ВМВД системи КГО виконує дві операції:

Обчислювальна операція № 1. Обчислення показань ФР на кожній окремій АД довжини ТВЕЛ, з використанням окремого вимірювального каналу датчика ВМВД системи КГО, проводиться відповідно до виразу (4.4):

$$Y = (X - X_0) \cdot C_1 \quad (4.4)$$

де $C_1 = 0,001$ – постійний коефіцієнт, що переводить показання вимірювальних датчиків ОМВД системи КГО з мкм в мм;

X_0 – постійний коефіцієнт, пов'язаний з розташуванням вимірювального каналу на АД і визначається при калібруванні;

X – поточні показання вимірювального каналу датчика ОМВД системи КГО.

Обчислювальна операція № 2. Обчислення значення висоти ТВЕЛ, проводиться відповідно до виразу (4.5):

$$Y(h_{ТВЕЛ}) = Y_1(\Delta h_{AC1}) + Y_2(\Delta h_{AC2}) + Y_3(\Delta h_{AC3}) + Y_4(\Delta h_{AC4}) + Y_5(\Delta h_{AC5}) \quad (4.5)$$

де Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 – показання параметра ФР на відповідній АД №1÷5 за довжиною ТВЕЛ окремими вимірювальними каналами датчиків ОМВД системи КГО.

Розглянемо методику виміру ефективного діаметра оболонки ТВЕЛ.

Вимірявши показання величини ФР на кожному активному АС №1÷5 по довжині ТВЕЛ, проводиться розрахунок площі поперечного перерізу і згідно з формулою (4.6), визначається ефективний зовнішній діаметр в заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ:

$$d_s = \frac{1}{n} \sum_i^n d_i \quad (4.6)$$

де n – кількість вимірів на АС за довжиною ТВЕЛ;

d_i – значення діаметра при кожному вимірі на АС №1÷5 за довжиною ТВЕЛ, у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ.

Розглянемо методику виміру овальності оболонки ТВЕЛ.

Отримавши розрахункове значення ефективного діаметра оболонки на кожному АС по довжині ТВЕЛ, визначається овальність оболонки на кожному АС по всій довжині ТВЕЛ, згідно з виразом (4.7) та (4.8):

$$\delta_{AC1} = \frac{d_{AC1}^{\max} - d_{AC1}^{\min}}{2} \quad (4.7)$$

$$\delta_{ACN} = \frac{d_{ACN}^{\max} - d_{ACN}^{\min}}{2} \quad (4.8)$$

де $d_{ACN}^{\max}, d_{ACN}^{\min}$ – максимальне та мінімальне значення діаметра в заданому поперечному перерізі на вимірюваному АС_N за висотою ТВЕЛ.

4.5 Визначення похибки результатів вимірювань геометричних параметрів

Визначення похибки результату вимірювання окремим датчиком вимірювання ВМВД системи КГО. Похибка результату вимірювання окремим вимірювальним датчиком на АС за довжиною ТВЕЛ, розраховують згідно з виразом (4.8):

$$Y = \sqrt{(x_0)^2 + (x)^2 + (con)^2} \quad (4.8)$$

де x_0 – похибка визначення величини коефіцієнта x_0 ;

x – похибка виміру величини x , мкм;

c_{con} – похибка стандартного зразка зовнішнього діаметра оболонки ТВЕЛ, що використовується при калібруванні вимірювального датчика, мкм (за умови, що $x_0 = x = 1$ мкм; $c_{con} = 3$ мкм; $Y = 3.5$ мкм).

Визначення похибки результату виміру діаметра оболонки ТВЕЛ. Похибке результату вимірювання діаметра оболонки ТВЕЛ розраховують на підставі рівняння (4.4) і визначається виразом (4.9):

$$d_{ext} = \sqrt{(Y_1)^2 + (Y_2)^2 + (Y_3)^2 + (Y_4)^2 + (Y_5)^2} \quad (4.9)$$

де Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 – похибки результатів вимірювання датчиками вимірювальних каналів модуля ОМВД системи КГО на АС №1÷5, мкм (за умови, що $Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 = 3.5$ мкм, $d_{ext} = 5$ мкм).

Визначення похибки вимірювання ефективного діаметра D у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ. Похибка вимірювання ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ, розраховується в модулі ОМВС системи КГО на підставі рівняння (4.3) згідно з виразом (4.10):

$$d_s = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (d_i)^2} \quad (4.10)$$

де d_i – похибка вимірювання діаметра ТВЕЛ в АС №1÷5, мкм;

n – число аксіальних сегментів (АС №1÷5) за довжиною ТВЕЛ у заданому поперечному перерізі (при п'яти аксіальних сегментах ($n=5$), було отримано значення похибки вимірювання ефективного діаметра в заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ – $d_s = 7$ мкм).

Визначення похибки вимірювання овальності оболонки ТВЕЛ. Похибка вимірювання овальності оболонки ТВЕЛ, розраховується на підставі рівняння (4.7) згідно з виразом (4.11):

$$ov = \sqrt{(d_{\max})^2 + (d_{\min})^2} \quad (4.11)$$

де d_{\max} – похибка вимірювання максимального діаметра, мкм;

d_{\min} – похибка вимірювання мінімального діаметра, мкм. (при цьому має виконуватися вимога: $d_{\max} = d_{\min} = d = 5$ мкм, $ov = 7$ мкм).

В результаті метрологічної атестації методик визначення геометричних параметрів ТВЕЛ, було встановлено, що:

– довірчі межі похибки визначення результату вимірювання окремим вимірювальним датчиком геометричних параметрів оболонки ТВЕЛ, становлять $\pm 2.7 \dots 6.8$ мкм;

– довірчі межі похибки визначення результату вимірювання діаметра оболонки ТВЕЛ становлять ± 0.6 мкм;

– довірчі межі похибки визначення результату вимірювання ефективного діаметра в заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ, становлять ± 0.6 мкм;

– довірчі межі похибки визначення результату виміру овальності оболонки ТВЕЛ, становлять ± 0.6 мкм.

Висновки до четвертого розділу

В результаті проведеного огляду та подальшого аналізу існуючих методів та систем контролю герметичності оболонок тепловиділяючих елементів, у розділу отримано наступні результати:

1. Удосконалено структурно-функціональну схему системи КГО, як підсистеми АСУ ТП енергоблоку АЕС.

2. Для визначення ушкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ, запропоновано застосовувати спеціальний інформаційно-обчислювальний модуль визначення дефектів у складі програмно-апаратних засобів системи КГО, для поєднання з програмним забезпеченням АСУ ТП енергоблоку АЕС.

3. Розроблено блок-схему алгоритму, для виконання запропонованого автоматизованого методу системи КГО у складі математичного забезпечення АСОК, для забезпечення контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ;

4. Розроблені та запропоновані етапи алгоритму фрактального методу, в яких визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності для встановлення місця, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти ТВЕЛ.

5. Запропоновано методику вимірювання геометричних параметрів ТВЕЛ, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля виявлення дефектів оболонки ТВЕЛ системи КГО. Для проведення метрологічної атестації методики вимірювань геометричних параметрів ТВЕЛ, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля системи КГО, була запропонована структурна схема обчислення геометричних параметрів ТВЕЛ.

Розглянуто методики виміру ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ та виміру овальності оболонки ТВЕЛ. Проведено визначення помилки результату: вимірювання окремим датчиком вимірювання обчислювального модуля системи КГО; виміру діаметру оболонки ТВЕЛ; вимірювання ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ; вимірювання овальності оболонки ТВЕЛ.

В результаті метрологічної атестації методик визначення геометричних параметрів ТВЕЛ було встановлено, що:

Довірчі межі похибки визначення результату вимірювання окремим вимірювальним датчиком геометричних параметрів ТВЕЛ, становити $\pm 2.7 \dots 6.8$ мкм;

Довірчі межі похибки визначення результату вимірювання діаметру оболонки ТВЕЛ становлять ± 0.6 мкм;

Довірчі межі похибки визначення результату вимірювання ефективного діаметра в заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ становлять ± 0.6 мкм;

Довірчі межі похибки визначення результату виміру овальності оболонки ТВЕЛ, становлять ± 0.6 мкм.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні вирішується важлива науково-практична задача підвищення точності та надійності критерію для визначення ступеня герметичності (розгерметизації) ТВЕЛ, шляхом розробки та впровадження експериментального методу контролю ушкодженості (деформації) структури оболонки ТВЕЛ, на основі методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому є інформаційно-вимірювальною системою контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ТВЗ ядерного реактора типу ВВЕР-1000, як підсистеми у складі АСУ ТП енергоблоку АЕС, що відповідає поставленій меті.

Критичний огляд літератури показав актуальність подальших досліджень методів контролю герметичності оболонки ТВЕЛ за допомогою обчислювального апарату фрактальної геометрії. Використання методу контролю, заснованого на застосуванні фрактальної теорії, дозволяє пов'язати зміну прирощень геометричних параметрів ТВЕЛ з параметрами величини фрактальної розмірності, яку можна визначати із залежності електричного опору (потужності) від прикладеної частоти при використанні скін-ефекту.

Розроблено фізичну модель оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнього циліндра, яка дозволила максимально наблизити дослідження структурного стану і фрактальних властивостей матеріалу оболонки при впливі поверхневих ушкоджуючих дефектів на підставі проведення імітаційного моделювання структурних змін на зовнішній і внутрішній поверхні ушкодженої оболонки, які впливають на геометрію ТВЕЛ.

Обґрунтовано проведення дослідження фрактальної структури фізичної моделі ушкодженої оболонки з використанням апарату фрактальної геометрії. Показано, що зміна геометричних параметрів ТВЕЛ залежить від структурно-фазових змін у матеріалі оболонки під впливом ушкоджуючих дефектів. Доведено, що фізична модель оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра дозволяє використовувати механізм скін-ефекту для дослідження змін товщини (глибини) оболонки ТВЕЛ при різній залежності електричного опору (потужності) від

прикладеної частоти. Виявлено, що при дослідженні фрактальної структури фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, спостерігається залежність зміни геометричних параметрів від структурно-фазового стану в об'ємі матеріалу, за наявності ушкоджуючих дефектів на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ.

Запропоновано, для кількісної оцінки стану структури оболонки ТВЕЛ, використовувати величину фрактальної розмірності площі зовнішньої та внутрішньої поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ як кількісну міру, що зв'язує зміну геометрії ТВЕЛ, з фрактальними властивостями структури ушкодженої оболонки.

Розглянуто застосування теорії скін-ефекту (залежності електричного опору і потужності від прикладеної частоти) для безпосереднього вимірювання величини фрактальної розмірності площі ушкодженої поверхні по всій довжині ТВЕЛ.

Показано, що у фрактальній структурі фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, реальна зовнішня та внутрішня площа ушкодженої поверхні та висота оболонки ТВЕЛ, знаходиться у ступеневій залежності від величини фрактальної розмірності.

Проведено порівняння та виявлено особливість отриманої вдосконаленої моделі ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ, яка полягає в тому, що вона дозволяє інтегровано визначати ступінь ушкодженості оболонки, залежно від температури, тиску, швидкості потоку нейтронів, радіаційного опромінення при зміні геометрії ТВЕЛ. Доведено вплив змін структурно-фазового стану об'єму структури матеріалу на фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ, на різній глибині скін-шару. Експериментально отримано, що збільшення геометричних параметрів (площа, висота) ТВЕЛ, знаходяться у ступеневій залежності від величини фрактальної розмірності, яка змінюється при збільшенні кількості локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин, що утворилися в структурі матеріалу оболонки, в результаті впливу ушкоджуючих дефектів. Експериментально обґрунтовано, що в якості критерія оцінки герметичності (розгерметизації) оболонки ТВЕЛ, практично застосовна величина фрактальної розмірності, для визначення місцезнаходження, типу і розміру ушкоджуючого дефекту в структурі оболонки ТВЕЛ.

Апробовано умову деформаційного критерію для розрахунку ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ, що враховує структурно-фазові зміни у фрактальній

структурі матеріалу оболонки, шляхом обчислення фрактальної розмірності на аксіальних сегментах по висоті ТВЕЛ.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Розроблено математичну модель розрахунку формозміни геометрії оболонки ТВЕЛ, яка дозволяє при розрахунку реальних геометричних параметрів, враховувати структурно – фазові зміни та фрактальні властивості в об'ємі матеріалу оболонки ТВЕЛ, при впливі ушкоджень на її зовнішню та внутрішню поверхню, на основі застосування теорії фрактальної геометрії.

2. Розроблено фрактальну модель ушкодженості оболонки ТВЕЛ, яка дозволяє визначити появу та зростання наскрізної тріщини в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, на основі розрахунку часу та швидкості формування загального кластера з молекул газу гелію в наскрізній тріщині із застосуванням обчислювального апарату фрактально-кластерної геометрії.

3. Розроблено 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.

Отримані наукові результати можуть бути використані при проведенні реакторного та післяреакторного контролю герметичності оболонок ТВЕЛ ТВЗ ядерних реакторів АЕС України, що дозволить встановлювати ступінь ушкодження та руйнування оболонки ТВЕЛ, без вилучення ТВЕЛ з ТВЗ, а також визначати місцезнаходження, тип та розміри дефектів на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ з похибкою, яка не перевищує 5%.

Показано, 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 ушкоджуючого 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, який залучається.

4. Обґрунтовано застосування інформаційно-вимірювального блоку виявлення та вимірювання дефектів оболонки ТВЕЛ, який дозволяє реалізувати обчислювальний (вимірювальний) алгоритм методу контролю, а також обробку інформації про ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ в режимі реального часу, та передачі її до програмно-обчислювального комплексу автоматизованої системи управління технологічним процесом енергоблоку АЕС на пульт автоматизованого робочого місця оператора, для прийняття рішення щодо експлуатації негерметичних ТВЕЛ та ТВЗ ядерного реактора АЕС. При цьому, помилка вимірювань, знижена не менше ніж у 1,25 разів у порівнянні з існуючими методами вимірювання системи КГО ТВЕЛ ядерного реактора АЕС.

5. Запропоновано методику вимірювання геометричних параметрів ТВЕЛ, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля виявлення дефектів оболонки ТВЕЛ системи КГО. Для проведення метрологічної атестації методики вимірювань геометричних параметрів ТВЕЛ, із застосуванням вимірювальних датчиків обчислювального модуля системи КГО, була запропонована структурна схема обчислення геометричних параметрів ТВЕЛ.

6. Розглянуто методики виміру ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ та виміру овальності оболонки ТВЕЛ. Проведено визначення помилки результату: вимірювання окремим датчиком вимірювання обчислювального модуля системи КГО; виміру діаметру оболонки ТВЕЛ; вимірювання ефективного діаметра у заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ; вимірювання овальності

оболонки ТВЕЛ.

7. В результаті метрологічної атестації методик визначення геометричних параметрів ТВЕЛ було встановлено, що: довірчі межі похибки визначення результату вимірювання окремим вимірювальним датчиком геометричних параметрів ТВЕЛ, становити $\pm 2.7 \dots 6.8$ мкм; довірчі межі похибки визначення результату вимірювання діаметру оболонки ТВЕЛ становлять ± 0.6 мкм; довірчі межі похибки визначення результату вимірювання ефективного діаметра в заданому поперечному перерізі оболонки ТВЕЛ становлять ± 0.6 мкм; довірчі межі похибки визначення результату виміру овальності оболонки ТВЕЛ, становлять ± 0.6 мкм.

Результати дисертаційної роботи використані на кафедрі «Фізики, електротехніки та електроенергетики» УПА, у рамках науково-дослідних тем Міністерства освіти і науки України: «Проект підсистеми контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС» (державний реєстраційний номер: 0122U200552, термін виконання 2021–2022 р.р.), у яких здобувач був виконавцем окремих розділів, при розробці і впровадженні в навчальний процес на кафедрі Фізики, електротехніки та електроенергетики.

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».

Таким чином мета та поставлені задачі в результаті теоретичних та практичних досліджень виконані.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”: Розпорядж. Каб. Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-р#Text> (дата звернення: 23.11.2022).

2. Рижов Д. І., Мустафін М. А, Підгаєцький Т. В., Леткова Н. Г. Окремі аспекти практичного використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. no. 4(84). С. 5–11.

3. Yang R., Cheng B., Deshon J., Edsinger K., Ozer O. Improve Fuel Reliability. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2006. Vol. 43, no. 9. P. 951–959.

4. Cho J. I. S., Neville T. P., Trogadas P. Capillaries for water management in polymer electrolyte membrane fuel cells. *International journal of hydrogen energy*. 2018. P. 21949–21958.

5. Рижов Д. І., Жабін О. І., Данильчук Є. Л., Трусов І. О., Посох В. О., Куров В. О. Методологічні підходи до визначення необхідності врахування різних технологічних умов експлуатації елементів енергоблоків АЕС під час оцінки їх сейсмостійкості відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. no. 3(91). С. 5–10.

6. Parga C. J., Rooyen I. J., Luther E. P. Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element. *Journal of Nuclear Materials*. 2018. no. 512. P. 252–267.

7. Jamet P. European union response to fukushima – european stress tests and peer review. 38 th. MPA-Seminar. *MPA University of Stuttgart*. 2012. P. 21–25.

8. Hofmann P. Current knowledge on core degradation phenomena. *Journal of Nuclear Materials*. 1999. no. 270. P. 194–211.

9. Freiria López M., Buck M., Starflinger, J. Criticality characteristics and sensitivity analysis of fukushima debris beds containing mcci products. *Journal of nuclear engineering and radiation science*. 2020. no. 6(4). P. 47–54.

10. Markov D., Smirnov V. Integration of post-irradiation examination results of failed WWER fuel rods. *Proc. of the Fifth International Conference WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. 2003. Bulgaria. P. 273–278.

11. Garzarolli, F., Jan R., Stehle H. The main causes of fuel element failure in water-cooled power reactors. *At. Energy Rev.* 1979. P. 31–36.

12. Adityasari W. Factor-performance factors of primary cooperatives of tni pusjarah cooperatives. TNI Puspen and TNI health centers in the TNI headquarters environment. *FISIP University of Indonesia*. 2016. P. 57–60.

13. Peters J., Robert H. In search of excellence: lessons from America's best-run companies. *Jakarta: Karisma Publishing Group*. 2007. P. 89–94.

14. Izawa K., Uchida Yu., Ohkubo K., Totsuka M., Sono H., Tonoike K. Infinite multiplication factor of low-enriched UO₂ – concrete system. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2012. vol. 49, no. 11. P. 1043–1047.

15. Wieselquist W., Lefebvre A. SCALE code system ORNL/TM-2005/39. *Oak Ridge National Laboratory*. 2020. P. 114–117.

16. Bilodid Ie., Dudka O., Kovbasenko Yu. Analysis of corium criticality in VVER-440 during severe accident. 29 th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. *Energoland, Mochovce NPP, Slovakia*. 2019. P. 22–29.

17. Hofmann P. Current knowledge on core degradation phenomena, a review. *Journal of Nuclear Materials*. 1999. no. 270. P. 194–211.

18. Jamet P. Results of the IAEA Study on fuel failures in water cooled reactors in 2006–2010. *Proc. of LWR Fuel Performance TopFuel, Charlotte NC*. 2013. P. 238–244.

19. Kadach M., Gamyn Yu. Profiling of a circular tube into a hexagon pipe of steel with increased boron content. *News of Higher Educational Institutions. Ferrous Metallurgy*. 2014. no. 57(11). P. 11–14.

20. Yang R. L Fuel performance evaluation for EPRI program planning. *Proc. Int. Top. Mtg on LWR Fuel Performance*. France. 1991. Vol. 1, P. 258.

21. Bespalko V. Transformation of boride inclusions in the production of piping for nuclear power. Construction, Materials Science, Mechanical Engineering: *Starodubovskiy Readings*. 2018. P. 107–112.

22. López M., Buck M. Criticality characteristics and sensitivity analysis of Fukushima debris beds containing MCCI products. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. 2020. no. 6(4). P. 23–38.

23. Sevón T. Molten core - concrete interactions in nuclear accidents. *Theory and design of an experimental facility*. 2005. P. 5–11.

24. Izawa K., Uchida Yu., Ohkubo K., Totsuka M., Sono H., Tonoike K. Infinite multiplication factor of low-enriched UO. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2018. P. 1043–1047.

25. Шепітчак А. В., Кухочький О. В., Лігоцький О. І., Кульман О. М. Підходи до розробки референтних рівнів західноєвропейської асоціації органів регулювання ядерної безпеки (WENRA) для дослідницьких реакторів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. no. 2(90). С. 4–11.

26. Scott P., Vaillant F. History of corrosion and mechanical degradation in operating plants – plant affected areas and actions. Second International conference on Flow Accelerated Corrosion (FAC 2010). *Proceedings. Lyon, France*. 2010. P. 315–320.

27. Hwang M., Jin E., Lee H., Jeon C. Wall thinning trend analyses for secondary side piping of Korean NPPs. 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. *Transactions. Prague, Czech Rep.* 2003. no. 5. P. 29–30.

28. Kain V., Roychowdhury S., Mathew T., Bhandakkar A. Flow accelerated corrosion and its control measures for the secondary circuit pipelines in Indian nuclear power plants. *Journal of Nuclear Materials*. 2008. Vol. 383(1–2). P. 86–91.

29. Michael J. V. Nuclear control rod position indication system. U.S. Patent, no.: US 10,020,081 B2. December. 2018.

30. Богорад В., Літвінська Т., Носовський А., Слєпченко Ю. Питання контролю герметичності оболонок тепловіділяючих елементів при застосуванні нових видів ядерного палива на АЕС України з реакторами ВВЕР-1000. *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки*. 2014. С. 29–30.

31. Sary M., Novotny F., Horak M., Stara M. Sampling robot for primary circuit pipelines of decommissioned nuclear facilities. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 119, P.103–303.

32. Tsitsimpelis I., Taylor J., Lennox B., Joyce J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Progress in Nuclear Energy*. 2019. Vol. 111, P. 109–124.

33. Kim S., Choi Y., Jeong K. A new approach to quantify safety benefits of disaster robots. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 49 (7), P. 1414–1422.

34. Mankevich S. K., Orlov E. P. Method of contactless control of installation of TVS in VVER. *Atomic energy*. 2017. Vol. 122, no. 1. P. 33–37.

35. Stanica D. M., Sisman G. R. Trends in computation a intelligence applied in nuclear engineer in gandnon-destructive examination techniques of nuclear units. in 7th International Conference on Electronics, *Computers and Artificial Intelligence*. 2015. P. 21–24.

36. Trojanowicz M. A. Review of flow analysis methods for determination of radionuclides in nuclear wastes and nuclear reactor coolants. *Talanta*. 2018. Vol. 183, P. 70–82.

37. Song B., Park J., Yun D. Depth-adaptive controller for spent nuclear fuel inspections. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. no. 52(8), P. 1669–1676.

38. Shin H., Jung H., Choi R., Kim C. Development of a shared remote-control robot for aerial work in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. no. 50(4), P. 613–618.

39. Ghosh A., Soto A., Veres S., Rossiter A. Human robot interaction for future remote manipulations in industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol., 53(2), P. 10223–10228.

40. Lotsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a WWER-1000 reactor core. Proceedings of the 19th AER Symposium on WWER Reactor. *Physics and Reactor Safety, St. Constantine and Elena resort, Bulgaria*. 2009. P. 53–108.

41. Ovdiienko I., Ieremenko M., Khalimonchuk V., Kuchin A. Evolution of SSTC WWER cross section library for DYN3D code. Proceedings of the twenty-second Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. *Průhonice, Czech Republic*. 2012. P. 83–91.

42. Овдієнко Ю. М., Кучин О. В., Єременко М. Л., Власенко П. А. Адаптація розрахункових моделей HELIOS паливних касет ВВЕР-440 для використання програмою TRACE/PARCS. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. no. 1(81), С. 46–51.

43. Rohee E., Coulon R., Jammes C., Filiatre P., Normand S., Carrel F., Lainé F., Hamrita H. Delayed Neutron Detection with graphite moderator for clad failure detection in Sodium-Cooled Fast Reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2016. P. 440–446.

44. Sihver L., Bjurman B. FINES – Fuel Integrity Evaluation And Surveillance System. *Topfuel*. Stockholm. 2001. P. 46–48.

45. Максимов М. В., Пелих С. Н. Вплив невизначеності початкових даних на оцінку довгостроковості оболонки ТВЕЛ при змінному режимі експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009. № 2. С. 13–19.

46. Suzuki M, Saito H, Udagawa Y. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-7 model and structure. *Japan Atomic Energy Agency*. 2013. JAEA-Data/Code 2013–014.

47. Suzuki M, Saito H. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-6 (Ver.1) detailed structure and user's manual. *Japan Atomic Energy Agency*. 2005. JAEA-Data/Code 2005–003.

48. Suzuki M. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V. *Japan Atomic Energy Research Institute*. 2000. JAERI-Data/Code 2000-030.

49. Udagawa Y, Yamauchi A, Kitano K. Development of fuel performance code FEMAXI-8—model improvements for light water reactor fuel analysis and systematic validation. *Japan Atomic Energy Agency*. 2018. P. 41–44.

50. Бойко О. В., Пелих С. В. Розробка дослідження автоматизованої системи управління властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 для програми регулювання потужності реактора з постійним тиском пари другого контуру. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. 2018. Том 29 (68), Ч. 1. № 6. С. 91–96.

51. Tang J., Huang M., Zhao Y., Ouyang X., Huang J. A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods. *Annals of Nuclear Energy*. 2017. Vol. 110, P. 492–500.

52. Pelykh S. N., Maksimov M. V., Baskakov V. E. Grounds of VVER-1000 fuel shell life control. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. no. 58. P. 188–197.

53. Yong S., Linzi Z. Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 163, P. 438–452.

54. Philip B. A. parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*. 2015. P. 143–171.

55. Zheng Y. Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method. *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 88, P. 437–460.

56. Hyung M. S., Kune Y. S. Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery. *Progress in Nuclear Energy*. 2011. Vol. 53, no. 7. P. 825–830.

57. Abdul R. K., Afzal R. A., Mohammed A. D., Ramis M. K. Effect of shell on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation. *Progress in Nuclear Energy*. 2019. Vol. 111, P. 1–14.

58. Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors. *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition)*. 2021. P. 95–115.

59. Shuang X., Xuhua Z., Gaojie H., Xiaxin C. CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. Vol. 53, no. 9. P. 2847–2858.

60. Мастиновский Ю. В. Фрактальный підхід до вирішення задачі з накопичення ушкодженихностей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2005. № 2. С. 80–83.

61. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывна математика. *Фрактальна геометрія - Освіта України*. 2016. Ч. 2. С. 618.

62. Lotsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a WWER-1000 reactor core. Proceedings of the 19 AER symposium on WWER reactor physics and reactor safety. *St. Constantine and Elena resort, Bulgaria*. 2019. P. 53–108.

63. Калінушкін А. Є., Курченков А. Ю., Мітін В. І., Семченков Ю. М. Сучасна система внутрішньреакторного контролю, перевірка ядерного палива ВВЕР-1000.

Ядерна та радіаційна безпека. 2010. no. 4(48). С. 18–21.

64. Saeed A., Rashid A. Development of core monitoring system for a nuclear power plant using artificial neural network technique. *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 144, P. 513.

65. Fujitsuka N., Tanouchi H., Imamura Y., Mizobuchi D., Kanagawa T., Masuda M. Experience and evaluation of advanced on-line core monitoring system BEACON at IKATA site, Proceedings of a Specialists Meeting on In-Core Instrumentation and Core Assessment. *Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA)*. 1997. P. 103–113.

66. Kovbasenko Y. Comparative Analysis of VVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability. *Universal Journal of Physics and Application*. 2016. Vol. 10, no. 4. P. 105–109.

67. Халимончук В. А. Функціонування програмного забезпечення СВРК ВВЕР-1000 верхнього рівня в умовах реалізації в Україні розширеної програми по диверсифікації ядерного палива. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. no. 1(65). С. 7–12.

68. Schulz G. Solutions of a 3D VVER-1000 Benchmark. Proc. 6-th Symposium of AER on VVER Reactor. *Physics and Safety, Kirkkonummi, Finland*. 1996. P. 54–58.

69. Павлович В. М. Фізика ядерних реакторів. *Інститут проблем безпеки АЕС*. 2009. С. 224.

70. Scandpower S. Advanced three-dimensional two-group reactor analysis code: *User's Manual; Technical Report No. SSP-09/447-U; Studsvik Scandpower: Nyköping, Sweden*. 2009. P. 1–12.

71. Downar T., Xu Y., Seker V. PARCS, v3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator: User Manual. *Technical report No. UM-NERS-09-0001; University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA*. 2013. P. 1–8.

72. Cho J., Song J., Lee K. Three-dimensional nuclear analysis system. *In Proceedings of the ANS Annual Meeting, Atlanta, GA, USA*. 2013. P. 1–11.

73. Щелокова М. А. Фрактальна геометрія до опису механізму руйнування. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет*. 2004. Вип. 8, С. 137–144.

74. Philip B., Berrill M. A., Allu S., Hamilton S. P., Sampath R. S., Clarno K. T., Dilts G. A. A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*. 2015. Vol. 286, P. 143–171.

75. Singh T., Mazumdar T., Pandey P., Varde P. Overview of reactor core level calculation by nodal and finite difference methods. *International Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. Vol. 4, no. 4, P. 11–21.

76. Lee D., Choi H., Lee K., Kim H. NEM and FDM hybrid method for 3-dimensional reactor core analysis. *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. Seoul, Korea*. 1999. P. 251.

77. Stacey W. Nuclear reactor physics, second edition, completely revised and enlarged edition. *Wiley-VCH Verlag*. 2007. P. 735.

78. Bibilashvili Yu. Experimental study of ver fuel rods behaviour under conditions, simulating RIA accident. *Enlarged Halden Programme Group Meeting*. Norway. 2002. P 54–60.

79. Nechaeva O. Researches Of Vver Fuel Rods Behaviour Under Ria Accident Conditions. *Fifth International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2003. P. 103.

80. Lee D., Kim Y., Kim Y. Consistent coupling of nodal expansion method, analytic nodal method, and finite difference method for 3-dimensional reactor core analysis. *Proceedings of PHYSOR 2010: Advances in Reactor Physics to Power the Nuclear Renaissance. Pittsburg, Pennsylvania, USA*. 2010. P. 312.

81. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском : НП 306.2.145–2008. *Державний комітет ядерного регулювання України*. 2008. С. 27.

82. Parshin N., Fedik I., Semishkin V. Modelling of behavior of 37 fuel rod assembly with Zr1%Nb-alloy simulators shell under loss-of-coolant accident conditions on PARAMETR-M facility. *Fifth International Conference on WWER Fuel Performance. Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2003. P. 97–103.

83. Pint B., Terrani K., Brady M., Cheng T., Keiser J. High temperature oxidation of

fuel shell candidate materials in steam–hydrogen environments. *J. Nucl. Mater.* 2013. no. 440. P. 420–427.

84. Terrani K., Zinkle S., Snead L. Advanced oxidation-resistant iron-based alloys for LWR fuel shell. *J. Nucl. Mater.* 2014. no. 448. P. 420–435.

85. Cheng T., Keiser J., Brady M., Terrani K., Pint B. Oxidation of fuel shell candidate materials in steam environments at high temperature and pressure. *J. Nucl. Mater.* 2012. no. 427. P. 396–400.

86. Lawrence D. Progress in nodal methods for the solution of the neutron diffusion and transport equations. *Progress in Nuclear Energy.* 1986. Vol. 17, no. 3, P. 271–301.

87. Kolev P., Lenain R. Solutions of the AER 3D Benchmark for VVER-1000, *CEA Internal Report, Saclay*, 1997. P. 127.

88. Prinsloo R., Tomašević I., Moraal H. A practical implementation of the higher-order transverse-integrated nodal diffusion method. *Annals of Nuclear Energy.* 2014. Vol. 68, P. 70–88.

89. Ольховик Ю. О. Перспективні схеми кондиціювання рідких радіоактивних відходів АЕС України. *Ядерна енергетика та довідки.* 2020. no. 3(18). С. 48–56.

90. Мальцева Т. В. Аналіз можливостей застосування ефективних матеріалів для переробки відходів на АЕС України. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті.* 2015. no. 2(17). С. 50–61.

91. System CGO TVELs YAG-12. Technical description and instruction manual. : *SNIP, ZHSH1.289.095T01.* 1988. P. 57.

92. Salyaev A., Kereksha A. CGO systems in BN reactors. *Innovations in atomic energy.* Abstracts of reports of the conference of young professionals. 2014. С. 212–216.

93. Розко А. М., Федоренко Ю. Г. Особливості цементування борвміщуючого імітату рідких радіоактивних відходів шлаколужним з'вязуючим з цеолітом. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 19): збірник матеріалів IV Міжнародної конференції.* Чернігів: ЧНТУ. 2019. С. 216.

94. NP 306.2.145–2008. Rules for Nuclear Safety of Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors: *approved by SNRIU Order No. 73 of 15.04.2008.* Kyiv:

SNRIU. 2008. P. 52.

95. NP 306.2.141–2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants: approved by SNRIU Order No. 162 of 19.11.2007. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*. 2008. no. 9. P. 226.

96. Rozko A., Fedorenko Yu., Zadvernyuk H. Zeolite as component binding materials for liquide radioactive waste conditioning. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2019. no. 1(20). С. 29–31.

97. Ольховик Ю. О., Федоренко Ю. Г., Розко А. М., Саєнко С. Ю., Шкуропатенко В. А. Цементування боратвмісних рідких радіоактивних відходів за підвищеної температури. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2019. no. 1(13). С. 59–66.

98. Lombard S. Safety Analysis of Mixed Cores in Pressurized Water Reactors in France. *IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors*. Vienna. 2011. P. 13–16.

99. Богорад В. І., Литвинська Т. В., Носовський А. В., Слепченко О. Ю. Питання контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів із впровадженням нових видів ядерного палива на атомних станціях України з реакторами ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. № 1(61). С. 29–33.

100. 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.

101. 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.

102. Жигалов Я. А., Пшеничний В. А. Визначення коефіцієнта ослаблення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання матеріалом оболонки циліндричних контейнерів для тимчасового зберігання рідких радіоактивних відходів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. no. 1(61). С. 34–44.

103. Hohorst J. MATPRO-A, a library of materials properties for light-waterreactor accident analysis. *Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab*. 1990. Vol. 4, P. 1098.

104. Dietmar Mertens H. Fuel Assembly Design and Licensing Aspects of Mixed Cores in PWRs. *IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors*. Vienna. 2011.

105. 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.

106. Likhanskii V., Afanasieva E., Efremov N., Zborovskii V. Development of defect size determination procedure in cask of WWER defective assembly detection system. *6th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2005. P. 101–105.

107. Likhanskii V. Development and using computer codes for improvement of defect assembly detection on WWER NPPs. *8th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2009. P. 88–94.

108. Likhanskiy V. V. Experimental off-reactor studies on modelling mass transfer processes for the development of methods of control of tightness of the casings of VVER reactors. *Questions of atomic science and technology*. 2006. Series: *Safety of the NPP*. Vol. 15, P. 145–157.

109. Kaplar E., Konobeyev A., Smimov V., Goryachev A., Prokhorov V., Eremin S. Mechanical properties of unirradiated and irradiated Zr-1%oNb shell under accident conditions. *Proceedings of the 27 Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, Maryland*. NUREG/CP-0169. USA. 2000. P. 71–75.

110. Lukyanov D. A., Albutova O. I. Automated workplace of the fuel shell tightness control system (AWS KTO) to support the operating personnel of fast neutron reactors. *Proceedings of the 18th International Conference of Young Professionals in Nuclear Power Plants*. 30-31 March 2016. P. 62–67.

111. Akio S., Shigeru S., Toshihiro F. Next-Generation ABWR and Future Nuclear Power Plants. *Toshiba review*. 2005. Vol. 60, no. 2. P. 14–21.

112. Krivenko P., Cao H., Petropavlovskii O., Weng L., Kovalchuk O. Efficiency of alkali activated hybrid cements for immobilization of low-level radioactive anion-exchange

rezins. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5. no. 10(83). P. 38–42.

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

114. Baydulín V., Druenne H., Gann V., Killeen J., Miasnikov A. Operation and licencing of mixed cores in water cooled reactors. *IAEA TECDOC series. TECDOC # 1720*. Vienna. 2013. P. 17–19.

115. Bogorad V., Lytvynska T., Poludnenko V. Combination of RanidSONNI Mobile Laboratory Devices and Rodos DSS computer Technologies to Forecast Consequences of Fires in the ChNPP Exclusion Zone. *Nuclear and Radiation Safety*. 2018. no. 3(79), P. 10–15.

116. Mittag S., Kuchin A. Assessment of spectral history influence on PWR and WWER core. *Kerntechnik*. 2012. no. 77(4), P. 278–285.

117. Iwase H., Niita K., Nakamura T. Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2002. Vol. 39, no. 11. P. 1142–1151.

118. Pelykh S., Maksimov V., Baskakov E. Grounds of VVER1000 fuel shell life control. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. no. 58. P. 188–192.

119. Топольницький М. В. Атомні електричні станції. *Підручник для вузів. Видавництво "Бескіт Біт"*. Львів. 2005. С. 524.

120. Широков С. В. Ядерні енергетичні реактори. *Навч. посібник НТТУ"КПІ"*. Київ. 2019. С. 220.

121. Широков С. В. Фізика ядерних реакторів. *Навч. посібник*. Київ. 1998. С. 288.

122. Носовський А. В., Лігоцький О. І., Чемерис І. О. Аналіз міжнародних підходів до розробки систем показників безпеки. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009. Т. 12, Вип. 4. С. 36–41.

123. IAEA Library Cataloguing in Publication Data Review of fuel failures in water

cooled reactors. *International Atomic Energy Agency*. Vienna. 2010. P. 29.

124. Lässer R., Baluc N., Boutard J. Structural Materials for DEMO: Development, Testing and Modelling. *Report on 24th SOFT*. Poland. 2006. P. 11–15.

125. Хом'як Е. А., Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Тимошенко О. А. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елемента 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.

126. 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 Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 3(162). С. 11–16.

127. Steffer Y. Comparative Analysis of VVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability. *Universal Journal of Physics and Application*. 2016. Vol. 10(4), P. 105–109.

128. Forgeron T. Experiment and Modelig of Advanced Fuel Rod Shell Behavior Under LOCA Conditions: Alpha-Beta Phase Transformation Kinetics and EDGAR Methodology. *Zirconium in the nuclear industry: Twelfth symposium, American Sosity for Testing and Materials*. West Conshohocken. P. 19428–2959.

129. Minet C., Brunetière N., Tournier B. Mixed lubrication modelling in mechanical face seals. *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference, IJTC 2008*. 2009. P. 477–479.

130. International organization for standardization: Sealed Radioactive Sources. *Classification, Rep. ISO 2919-1980(E)*, ISO. Geneva. 1980. P. 32.

131. International organization for standardization: Radiation Protection — Sealed Radioactive Sources. *Leakage Test Methods, Rep. ISO 9 8*, ISO. Geneva. 1992. P. 87.

132. American national standards institute: American National Standard for Leakage Tests on Packages for Shipment of Radioactive Material. *ANSI N14.5-1 7*, ANSI. New York. Vol. 1, P. 7.

133. International organization for standardization: Safe Transport of Radioactive

Material. *Leakage Testing of Packages, Rep. ISO 12807:1996(E), first edition 1996.09.15, ISO*. Geneva. 1996. P. 15.

134. International organization for standardization: Radioactive Materials — Packaging. *Test for Contents Leakage and Radiation Leakage, Rep. ISO 2855-1 6(E), ISO*. Geneva. P. 6.

135. Directory of Test Facilities for Radioactive Materials Transport Packages. *Special Issue, Int. J. Radioact. Mater. Transp.* 1991. no. 2. P. 4–5.

136. Friedmann H. Final results of the Austrian radon project. *Health Phys.* 2005. Vol. 89, P. 339–348.

137. Fedotov P. Analytical functions used for description of the plastic deformation process in zirconium alloys WWER type fuel rod shell under designed accident conditions. *Proceedings of the Fifth International Conference. WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2003.

138. Howarth C., Miles J. Results of the 2003 NRPB Intercomparison of Passive Radon Detectors. *HPA-RPD-027*. 2007. P. 63.

139. Pantelić G., Čeliković I., Živanović M., Vukanac I., Nikolić K., Cinelli G., Gruber V. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 204, P. 163–174.

140. Melnykov O., Viniarskyi Ya., Karpenko O. Features of nuclear detection and radioactive materials at the border in the context of general security of the state. *Modern special equipment*. 2012. Vol. 4(31), P. 125–134.

141. Шугайло А. П., Рижов Д. І., Крицький В. Б., Романов С. В., Колупаєв А. М. Рекомендації по удосконаленню національної нормативної бази у частині подовження строку експлуатації та управління енергоблоку АЕС України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2013. no. 3(59). С. 3–9.

142. Карасьова О. В., Соколенко В. І., Дергач Т. А. Механічні властивості та повзучість зразків з тру-оболонок ТВЕЛ та сплаву Zr1Nb у температурному інтервалі 77...650 К. *Питання атомної науки та техніки*. 2005. № 3. С. 94–98.

143. Asmolov V., Lioutov K. Development of Data Base with Mechanical Properties of Un-and Preirradiated VVER shell. *Proceedings of the 25' Water Reactor Safety*

Information Meeting, Bethesda, Maryland. USA, NUREG/CP-0162. 1998. P. 31–33.

144. Lioutov K., Kaplar E. Overview of test results on mechanical properties of unirradiated and irradiated Zr-1%Nb (E-110 alloy) shell. *Proceedings of Nuclear Safety Research Conference Information Meeting. Washington. DC. 2001. P. 12.*

145. Шидловський М. С., Бабенко А. Є., Боронко О. О., Заховайко О. П., Трубачев С. І. Нові матеріали: частина 2 - Експериментальні методи досліджень механічних властивостей конструкційних полімерів та пластмас. *Навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» спеціалізації «Динаміка і міцність машин».* 2017. С. 265.

146. Shishov V. N. Influence of Zirconium Alloy Chemical Composition on Microstructure Formation and Irradiation Induced Growth. Zirconium in the nuclear industry: Thirteenth international symposium, ASTM STP 1423. *American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA. 2002. P. 87–91.*

147. Пелих С. Н., Максимов М. В., Назаренко О. А. Метод управління властивостями твелів у нормальних умовах експлуатації реактора. *Пр. Одес. політехн. ун-ту. Одеса.* 2012. Вип. 2 (39), С. 113–123.

148. Van Nieuwenhove R., Andersson V., Balak J., Oberländer B. In-pile testing of CrN, TiAlN and AlCrN Coatings on Zircaloy shell in the Halden Reactor. *18th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry. STP15 ASTM International's STP. 2017. P. 115–118.*

149. Airiskallio E., Nurmi E., Heinonen M. H., Väyrynen I. J., Kokko K., Ropo M. High temperature oxidation of Fe–Al and Fe–Cr–Al alloys: the role of Cr as a chemically active element. *Corros.* 2010. no. 52. P. 3394–3404.

150. Bunn J. K., Fang R. L., Albing M. R., Mehta A., Kramer M. J., Besser M. F. A high-throughput investigation of Fe–Cr–Al as a novel high-temperature coating for nuclear shell materials. *Nanotechnology.* 2015. no. 26. P. 1–9.

151. Ejenstam J., Thuvander M., Olsson P., Rave F., Szakalos P. Microstructural stability of Fe–Cr–Al alloys at 450–550°C. *Mater.* 2015. no. 457. P. 291–293.

152. Heinonen M. H., Kokko K., Punkkinen M. P. J., Nurmi E., Kollár J., Vitos L. Initial Oxidation of Fe–Al and Fe–Cr–Al alloys: Cr as an alumina booster. *Oxid. Met.* 2011.

no. 76. P. 331–346.

153. Park D. J., Kim H. G., Park J. Y., Jung Y. I., Park J. H., Koo Y. H. A study of the oxidation of FeCrAl alloy in pressurized water and high-temperature steam environment. *Corros.* 2015. no. 94. P. 459–465.

154. Anghel C. Modified oxygen and hydrogen transport in Zr-based oxides. *Doctoral Thesis. Division of Corrosion Science Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology.* Sweden. 2006. P. 256.

155. Ньювенхове Р. Огляд дослідження ATF та текучих експериментів у реакторі Halden (включаючи нові дослідження палива на основі графену). *Фінансований ЄС семінар із розширення з грантами "Матеріали, стійкі до екстремальних умов для майбутніх енергетичних систем"*. Україна. 2017. P. 62–67.

156. Zinkle S. J., Terrani K. A., Gehin J. C. Accident tolerant fuels for LWRs *Journal of Nuclear Materials.* 2014. no. 448. P. 374–379.

157. Мазуренко Н. І. Фрактальна геометрія. *Навчальний посібник.* Івано-Франківськ. 2010. С. 65.

158. 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.

159. Guidelines for Accident Analysis of WWER Nuclear Power Plants. *EBP-WWER-01, IAEA.* 1995. P. 136.

160. Belles, R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs). *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors.* 2021. P. 95–115.

161. Неклюдов І. М., Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Добровольська Л. Н. Застосування методу акустичної емісії для діагностування корпусів ядерних реакторів (огляд). Повідомлення І. Еволюція застосування неруйнівного контролю у світовій ядерній енергетиці. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2014. № 3. С. 41–54.

162. Бородин О. В., Кальченко А. С., Купріянова Ю. Э., Мельниченко В. В., Неклюдов И. М., Пермяков А. В. Радіаційне розбухання ферритно-мартенситних

сталей ЕП-450 та НТ-9 при опроміненні металевими іонами до високих доз. Питання атомної науки та техніки. *Серія: Фізика радіаційних ушкоджень та радіаційне матеріалознавство*. 2011. № 2. С. 10–15.

163. Gaft, J., Martsinkovskyy, V., Gromyko, B., Zahorulko, A. Design and calculation of mechanical seals with self-adjusting clearance. Proc. XVII Int. Conf. on Fluid Sealing. *BHR Group, York, England*. 2003 P. 505–520.

164. Шугайло О. П., Плачков Г. І., Гребенюк Ю. П., Шевченко І. А., Дибач О. М., Зелений О. В., Москалішин Р. І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018. no. 3(79). С. 3–9.

165. Bryk V. V., Garner F. A. Prediction of void swelling in the baffle ring of WWER-1000 reactors for service life of 30-60 years. *Mater.* 2013. Vol. 437, no. 1(3). P. 415–423.

166. Гребенюк Ю. П., Зелений О. В., Рижов Д. І., Брік Д. С., Черняк Я. П. Отриманий досвід та вивчені уроки щодо діяльності з переходу енергоблоків АЕС України до довгострокової експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. no. 1(85). С. 15–28.

167. Trush V. S., Lukianenko O. H., Stoev P. I. Influence of modification of the surface layer by penetrating impurities on the long-term strength of Zr–1% Nb Alloy. *Materials Science*. 2020. no. 55(4). P. 585–589.

168. Van Lam Do, Thi Mai Dung Do & Toru Ogawa, Features of Zr-rich corner of the Zr-N-O ternary system by controlled low-pressure oxidation and thermodynamic analysis. *Journal of Nuclear Science and Technology*. P. 1–11.

169. Yu S., Zeng Q., Oganov A. R., Frapper G., Huang B., Niu H., Zhang L. First-principles study of Zr–N crystalline phases: phase stability, electronic and mechanical properties. *RSC Advances*. 2017. no. 7(8). P. 46–47.

170. Бережко П. Г., Тарасова О. І., Кузнєцов О. О. Гідрування титану та цирконію і термічне розкладання їх гідридів. *Альтернативна енергетика та екологія*. 2006. № 11(43). С. 47–56.

171. Лігоцький О. І., Печериця О. В., Кульман О. М., Москалішин Р. І., Халенко Р. В., Курман О. М. Результати аналізу подій на АЕС України, спричинених старінням. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. no. 2(86). С. 44–51.

172. Krings A., Oman P. A simple GSPN for modeling common mode failures in critical infrastructures. Proceedings of the 36 Annual Hawaii International Conference on System Sciences. *Big Island, HI, USA*. 2003. P. 10–19.

173. Борисенко В. І., Горанчук В. В. Модель реактивнісної аварії РБМК-1000 енергоблока № 4 Чорнобильської АЕС. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2021. № 2 (21). С. 39–48.

174. Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Thechnologies*. 2021. no. 3/8(111). P. 75–89.

175. Рижов Д. І., Мустафін М. А., Підгаєцький Т. В., Леткова Н. Г. Окремі аспекти практичного використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. no. 4(84). С. 5–11.

176. Pogosov A. Yu., Levchenko V. V., Vikovsky Yu. M. Analysis of prospects for application of intellectual digital temperature sensors in data channels of on-line control means at nuclear power plants. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine*. 2019. P. 76–79.

177. Воробйов Ю. Ю., Жабін О. І. Оцінка застосування моделі деформації оболонок ТВЕЛ розрахункового коду RELAP5/MOD3.2 для палива реакторів ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 4 (64). С. 17–21.

178. Williamson R. L., Hales J. D., Novascone S. R., Tonks M. R., Gaston D. R., Permann C. J., Andrs D., Martineau R. C. Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *Journal of Nuclear Materials*. 2012. no. 423. P. 149–163.

179. Morkin M. S. Features of methods for monitoring the fuel shell tightness in lead-cooled fast breeder reactors. *Nuclear Energy and Technology*. 2021. no. 7(4). P. 319–325.

180. Жабін О. І., Франкова М. В. Застосування моделі деформації оболонок твелів розрахункового кода RELAP5/MOD3.2 для палива реакторів ВВЕР-1000 при

аналізі ушкоджень. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 3(71). С. 19–22.

181. 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.

182. 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.

183. Olander D., Konashi K., Yamawaki M. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. *Comprehensive Nuclear Materials*. 2012. Vol. 3, P. 313–357.

184. Canete J. F., Galindo C., Garcia-Moral I. System Engineering and Automation: An Interactive Educational Approach. *Berlin: Springer*. 2011. P. 266.

185. Pecchia M., Vasiliev A., Ferroukhi H., Pautz A. A methodology for evaluating weighting functions using MCNP and its application to PWR ex-core analyses. *Channells of Nuclear Energy*. 2017. Vol. 105, P. 121–132.

186. Kirillov P. L., Ninokata H. Thermal-Hydraulics of Water Cooled Nuclear Reactors. *Science direct*. 2017. P. 357–492.

187. Grunberg K. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. *IAEA Safety Standards Series No. SSG-39*. Vienna. 2016. P. 161.

188. Бутова О. М., Клевцов О. Л., Печериця О. В., Трубчанінов С. О., Ястребенецький М. О. Аналіз експлуатаційних подій, викликаних дефектами цифрових інформаційних та керуючих систем атомних електростанцій. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. no. 2(82). С. 47–53.

189. Vetterli M., Kovačević J., Goyal K. Foundations of signal processing. *Cambridge University Press*. 2014. P. 738.

190. Addison S. The illustrated wavelet transform handbook: Introductory Theory and Applications in Science. *Engineering, Medicine and Finance*. CRC Press. 2002. P. 368.

191. Крушинський А. Г., Горанчук В. В., Сидорук Н. М. Development of methods and means of control of subcriticality of reactor core. *Institute of Nuclear Safety Problems of*

NAS of Ukraine. 2011. P. 71.

192. Puthiyavinayagam P., Selvaraj P., Balasubramaniyan V., Raghupathy S., Velusamy K., Devan K., Nashine B. et. al. Development of fast breeder reactor technology in India. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. Vol. 101, P. 19–42.

193. 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.

194. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Thechnologies*. 2018. no. 5/5(95). P. 20–28.

195. Philip B. A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*. 2015. P. 143–171.

196. Погосов А. Ю., Дерев`янюк О. В. Метрологічне забезпечення експлуатації АЕС. *Одеса: Наука і техніка*. 2016. С. 204.

197 . Про затвердження Вимог безпеки під час поводження з ядерним паливом : Наказ М-ва юстиції України від 21.06.2019 р. № 269.

198. Крицький В. Б., Муха В. В., Носовський А. В., Підгаєцький Т. В., Погонєць О. С. Огляд загальних аспектів використання різних типів тепловидільних збірок у змішаних паливних завантаженнях ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 3(71). 2016. С. 48–32.

199. Галаган Р. М., Єременко В. С. Ультразвуковий контроль відкритої мікроскопічної пористості фарфорових ізоляторів: монографія. *НТУУ «КПІ»*. 2016. С. 116.

200. Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. Імпульсний вихрострумний контроль об'єктів циліндричної форми. *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*. 2013. Вип. 45. С. 69–75.

201. Song-Lin L., Wei H., Peng J. Decreased sensitivity to gap effects in pulsed eddy current testing using two-stage differential probes. *Defectoscopy*. 2008. no. 2. P. 84–93.

202. Лисенко Ю. Ю., Куц Ю. В. Дослідження імпульсного режиму збудження вихрострумівих перетворювачів. *НК та технічна діагностика UkrNDT-2012*. 2012 С. 439.

203. Васильченко В. Н., Інюшев В. В., Кустов К. В. Атестація системи вихреструмівого котролю теплообмінних труб у колекторах парогенераторів «CASTOR». *Ядерна енергетика та довкілля*. № 3(15). 2019. С. 18–25.

204. Williamson R. L., Hales J. D., Novascone S. R., Tonks M. R., Gaston D. R., Permann C. J. et. al. Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *Journal of Nuclear Materials*. 2012. Vol. 423, no. 1(3), P. 149–163.

205. Fiorina C., Clifford I., Kelm S., Lorenzi S. On the development of multi-physics tools for nuclear reactor analysis based on OpenFOAM: state of the art, lessons learned and perspectives. *Nuclear Engineering and Design*. 2022. Vol. 387, P. 1–15.

206. Швецов В. Л., Губский А. Н., Пальков И. А., Пальков С. А. Місцність високонапружених елементів парової турбіни. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2012. no. 7. С. 70–75.

207. 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.

208. 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.

209. Palkov I., Shulzhenko M., Thermostressed state of the lock joint of turbine rotor blades of the first stage of K-500-240 steam turbine medium pressure cylinder. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. no. 3. P. 36–43.

210. Palkov S., Shulzhenko M. Elastic Stress-Strain State of Elements of the Internal High-Pressure Casing for Steam Turbines. *Journal of mechanical engineering*. 2019. Vol. 22, no. 4. С. 32–40.

211. Крицький В. Б., Мар'єнков М. Г., Бабик К. М., Недзведська О. Г., Нелінійна сейсмічна реакція захисної оболонки АЕС після проектної аварії. *Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції»*. 2015. no. 82. С. 619–636.

212. 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.

213. 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.

214. James W. Computational Methods in Reactor Shielding. *Science direct*. 1982. P. 192–269.

215. Рижов Д. І., Кендзера О. В., Мар'єнков М. Г., Шендерович В. Я., Буряк Р. Я. Про сучасні вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017, no. 2 (74). С. 9–13.

216. Byun S. Med Phys 4R06/6R03 Radioisotopes and Radiation Methodology. *Chapter 3 Gas Filled Detectors*. Canada: McMaster University. 2016. P. 16.

217. Rudychev V., Rudychev V., Azarenkov N., Bondar Y. Optimization of the detection system for N registration along with coolant leaks in the WWER-1000 steam generator. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013. Vol. 3(85), P. 259–267.

218. Akyurek T., Yousaf M., Liu X., Usman S. GM counter deadtime dependence on applied voltage, operating temperature and fatigue. *Radiation Measurements*. 2015. no. 73, P. 26–35.

219. Воробйов Ю. Ю., Жабін О. И. Оцінка застосування моделі деформації оболонок ТВЕЛів для палива реакторів ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 3. С. 3–7.

220. 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.

221. 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.

222. Sayers C. M. Ultrasonic velocity dispersion in porous materials. *J Phys D*. 1981. no. 14. P. 413–420.

223. Kononov I. I., Chuev V. V., Mityurev K. V. Identification of factors of accelerated accumulation of damage in the casings of TVELs, irradiated in the reactor BN-600, non-destructive control methods. *News of Universities. Nuclear Energy*. 2011. no. 2. P. 171–180.

224. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman & Co. 2000. P. 468.

225. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Хом`як Е. А. Методи контролю герметичності твел для підвищення ядерної безпеки АЕС. *Молодь і технічний прогрес в АПК: Матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції*. Харків: ХНТУСГ. 2019. Том 2, С. 230.

226. Goorley J., James M., Booth T. E. Initial MCNP6 Release Overview – MCNP6 version 1.0 (LA-UR-13-22934). *Los Alamos National Laboratory*. 2013. P. 43.

227. Daures J., Gouriou J., Bordy J. Monte Carlo determination of the conversion coefficients $H(3)/K$ in a right cylinder phantom with Penelope code. Comparison with MCNP simulations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011. Vol. 1(144), P. 37–42.

228. Ghosh J. K., Muralidhar S., Chandrasekharan K.N. Nondestructive evaluation of plate type nuclear fuel elements for PURNIMA-III and KAMINI research reactors. *Science direct*. 1992. P. 130–137.

229. Носовский А. В., Васильченко В. Н., Павленко А. А. Введення в безпеку ядерних технологій. *Книжкове видання*. Київ. 2006. С. 360.

230. Nihan O. Pressurized Heavy Water Reactors CANDU. *JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation*. 2022. Vol. 7, P. 45–68.

231. Skomorokhov A.O., Lukyanov D.A. Application of the method of recompense to determine the location of unsealed assemblies in fast neutron reactors. *University News. Nuclear power*. 2007. no. 2. P. 39–43.

232. Демченко В. В., Бородавка Є. В. Геометричне моделювання і комп'ютерна графіка. *КНУБА*. 2010. С. 288.

233. Dawson J. W., Phillips M. Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering. *Woodhead Publishing Series in Energy*. 2012. P. 300–332.

234. Dawahra S., Khattab K., Alhabit F. MNSR transient analysis using the RELAP5/Mod3.2 code. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. Vol. 52, no. 9. P. 1990–1995.

235. Papin J. Behavior of Fast Reactor Fuel During Transient and Accident Conditions. *Comprehensive Nuclear Materials*. 2019. Vol. 2, P. 339–362.

236. Clifford I., Pecchia M., Puragliesi R., Vasiliev A., Ferroukhi H. On the characteristics of the flow and heat transfer in the core bypass region of a PWR. *Nuclear Engineering and Design*. 2018. Vol. 330, P. 117–128.

237. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantelieieva I., Oliynyk Y., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, no. 5 (95), P. 20–28.

238. DOMANUS J. C. Non-Destructive Testing. *Proceedings of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing*. 1989. P. 129–134.

239. Hyung, M. S., Kune, Y. S. Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery. *Progress in Nuclear Energy*. 2011. Vol. 53, no. 7. P. 825–830.

240. 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.

241. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Vasyuchenko P., Khomenko V. Improving the reliability of information control systems at power generation facilities based on the fractal cluster theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, no. 9(92). P. 4–12.

242. 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.

243. 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.

244. Skelton R. P. Comprehensive Structural Integrity. *Science direct*. 2003. Vol 5, P. 25–112.

245. Mclean T. D., Seagraves D. T. ANS 2018 Tutorial on MCNP Applications (rev. 1). American Nuclear Society 20th Topical meeting on Radiation Protection and Shielding Design. LA-UR-18-28070. *Los Alamos National Laboratory*. 2018. P. 86.

246. Хом'як Е. А., Буданов П. Ф., Кирисов І. Г. Удосконалення системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора. *Збірник наукових праць «Машинобудування»*. УПА. 2022. С. 46–65.

247. Forrest R. A., Tabasso A., Danani C. Handbook of Activation Data Calculated using EASY-2007. *EURATOM/UKAEA Fusion Association, UKAEA FUS 552*. 2009. P. 670.

248. Iggins P., Attix F., Hubbell J., Seltzer S., Berger M., Sibata C. Mass energy-transfer and mass energy-absorption coefficients, including in-flight positron annihilation

for photon energies 1 keV to 100 MeV. *National Inst. of Standards and Technology, USA. NISTIR-4680, PB92-126473*. 1991. P. 66.

249. Kloos M. SUSAS – Software for uncertainty and sensitivity analyses. *Version 4.0, User's Guide and Tutorial. GRS-P-5, Rev. 1, Garching*. 2015. P. 541–549.

250. Kloos M. The tool SUSAS 4 for probabilistic uncertainty and sensitivity analyses. UNCECOMP 2015. 1st ECCOMAS Thematic Conference on International Conference on Uncertainty Quantification in Computational. *Sciences and Engineering, Crete Island, Greece*. 2015. P. 1143–1144.

251. Collins Y., Downar T. GENPMAXS v. 9: Program for Generating the PARCS Cross Section Interface File PMAXS. *UM-NERS-09-004. October*. 2009. P. 79–83.

252. Спосіб управління ядерною енергетичною установкою з реактором водяного типу при зміні потужності реактора або зовнішнього навантаження : пат. 100070 Україна : МПК G 21 С 7/00. № а 201102326 ; заявл. 28.02.2011 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

253. Alanberg R. Non-linear skin-effect in half-metals. *Physics of the rigid body*. 2013. no. 55 (10). P. 1903–1907.

254. 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.

255. Буданов П. Ф., Хомяк Е. А. Удосконалення системи контролю герметичності оболонки тепловиделяючого елемента ядерного реактора. *Збірник наукових праць «Машинобудування»*. УПА. 2022. № 29. С. 32–49.

256. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Kupriianova R. A General Approach for Tolerance Control in Quality Assessment for Technology Quality Analysis. *Advanced Manufacturing Processes IV: Selected Papers from the 4th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2022)*, September 6-9, 2022, Odessa, Ukraine. P. 330–339.

257. Ginevičius R., Trishch R., Bilan Y., Pencik J. Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area

Countries. *Energies* 15 (9), P. 3322.

258. Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Bondarenko T. Mathematic model of the general approach to tolerance control in quality assessment. *Advanced Manufacturing Processes III*. P 415–423.

259. Trishch R., Nechuiviter O., Dyadyura K., Vasilevskiy O., Tsykhanovska I., Yakovlev M. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. *MM science journal*. 2021. P. 4769–4774.

260. Моргунов В., Тріщ Р., Литовченко С., Чишкала В., Грінченко Г., Тріщ А. Numerical simulation of measurements in radiation technologies. *Український метрологічний журнал/Ukrainian Metrological Journal*. 2021. С. 60–64.

261. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2020. no. 1 (11), P. 156–162.

262. Тріщ Р. М., Денисенко А. Н., Черняк Е. Н., Мельниченко А. А., Тріщ Н. М. Ефективні статистичні оцінки показників якості об'єктів кваліметрії за їхнього нормального закону розподілу. *Znanstvena Misel*. 2019. С. 26–29.

263. Тріщ Р. М., Денисенко А. Н., Черняк Е. Н. Метод визначення закону розподілу показників якості виробів, як випадкової величини. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 1. С. 99–102.

264. Panda A., Anisimov V., Dyadyura K., Pandova I. The usage of material quality indicators to assess the properties of linear block-copolyurethanes based on oligoeters. *MM Science Journal*. 2022. P. 5979–5983.

265. Залога В. О., Дядюра К. О., Івченко О. В., Залога О. О. Нормативне забезпечення неруйнівного експрес-методу оцінювання якості лез різального інструменту. *Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях*: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. 2017. С. 172–173.

266. Залога В. О., Дядюра К. О., Рибалка І. М. Процесний та функціональний підходи при розробці системи управління якістю. *Сумський державний університет*. 2018. С. 64–65.

267. Залога В. О., Дядюра К. О., Рибалка І. М., Грошовик Д. О. Особливості впровадження інтегрованих систем управління якістю. *Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма ві всеукраїнської науково-технічної конференції*. 2019. С. 72.

268. Boyko T., Korchynska O. Risks assessment of suppliers' products life cycle processes based on their audit results in accordance with the standard VDA 6.3. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2017. Vol. 78, P. 93–100.

269. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/3 (82), P. 18–24.

270. Ginevičius R., Trishch H., Petraškevičius V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*. 2015. № 28 (1), P. 1096–1110.

271. Trishch R., Maletska O., Hrinchenko H. Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017. *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*. 2019. P. 715–720.

272. Trishch R., Kupriyanov O., Cherniak O. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry. *Engineering Management in Production and Services*[this link is disabled](#). 2021. № 13 (2), P. 107–114.

273. Trishch R., Hrinchenko H., Hrinchenko V., Kiporenko O. Qualimetric assessment of the quality of objects of different nature. *Якість, стандартизація та метрологічне забезпечення*. 2022. С. 77.

274. Hrinchenko H., Mazorchuk K., Kiporenko O. Qualimetry risk assessment of technical systems functioning. *Національний науково-практичний форум*. 2022. С. 89–91.

275. Hrinchenko H., Trishch A. Technical diagnostics and features of measuring NPP

power equipment parameters. *American journal of engineering research (AJER)*. 2021. Vol. 10, P. 269–274.

ДОДАТОК А

ДОКУМЕНТИ, ЯКІ ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ОСНОВНИХ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор



Української інженерно-педагогічної академії

Сергій ПЕТРОВ

21 лютого 2022 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Хом'яка Едуарда Анатолійовича на тему: «Метод оцінювання якості параметрів тепловиділяючого елемента енергоблоку атомної електростанції», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Хом'яка Едуарда Анатолійовича впроваджені у навчальний процес кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики при проведенні занять з дисциплін: «Автоматизований моніторинг та діагностика обладнання АЕС»; «Концепції сталого розвитку та енергетичної системи»; «Аналіз і моделювання процесів в електричних системах та об'єктах».

Практичні результати використовуються при викладанні вищезгаданих дисциплін, а також під час виконання курсових та дипломних робіт студентами електроенергетичних спеціальностей.

Завідувач кафедри

фізики, електротехніки і електроенергетики

Артем ЧЕРНЮК

УДК 621.039.54

№ держреєстрації 0122V200550

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи


Купріянов О.В.

07 2021 року

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО – ТЕХНІЧНУ РОБОТУ

ПРОЄКТ ПІДСИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ
ОБОЛОНКИ ТВЕЛ ПТК АСУТП ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС
(заключний 2021 р.)


Декан факультету енергетики,
і автоматизації, к. т. н., доц.

 Н.С. Антоненко

Керівник НДР, к. т. н., доц.

 П.Ф. Буданов

Керівник групи з наукової
діяльності, к. т. н., доц.

 Г.С. Грінченко

Результати роботи розглянуто
науково-технічною радою УІПА
Протокол від 29.06.2021р. №9
Харків 2021

ПЕРЕЛІК ВИКОНАВЦІВ

Керівник теми, доцент,
канд. техн. наук



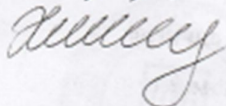
П.Ф. Буданов
(загальне та наукове
керівництво, вступ)

Доцент, канд. техн. наук



К.Ю. Бровко
(розділ 2) (висновки)

Аспірант



Е. А. Хом'як
(розділ 1-2) (висновки)

Здобувач вищої освіти



Д.Ю. Крохмаль
(розділ 1)

Здобувач вищої освіти



І.І. Волков
(розділ 1)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНА АКАДЕМІЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Олександр КУПРІЯНОВ
"01" листопада 2022 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Хом'яка Едуарда Анатолійовича на тему: «Метод оцінювання якості параметрів тепловиділяючого елемента енергоблоку атомної електростанції», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Запропонований метод контролю для інформаційно-вимірювальної системи герметичності оболонки елементів ядерного реактора атомної електростанції, який викладено в дисертації Хом'яка Е.А., використано в Українській інженерно-педагогічній академії при виконанні науково-дослідної роботи «Проект підсистеми контролю герметичності оболонки ТВЕЛ ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС» (державний реєстраційний номер: 0122U200550), в якій здобувач Хом'як Едуард Анатолійович, був виконавцем.

Доцент кафедри

фізики, електротехніки і електроенергетики

керівник НДР № 0122U200550



Павло БУДАНОВ

Завідувач кафедри

фізики, електротехніки і електроенергетики



Артем ЧЕРНЮК

ДОДАТОК Б

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

I. 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.*

II. 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. III 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.

III. 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 елемента 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.