

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].

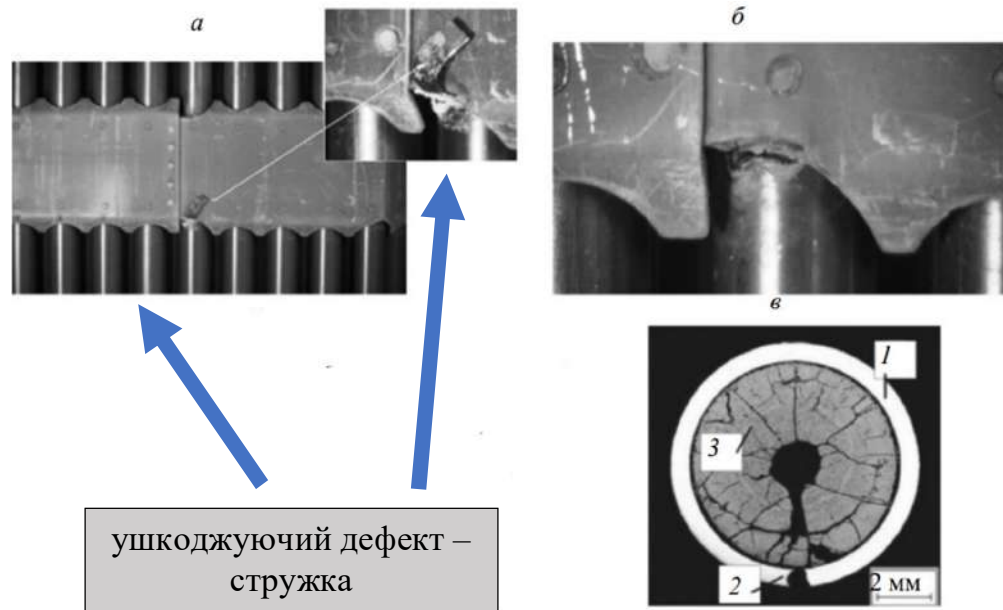


Рис. 1.8. Приклад утворення debris-дефекту: а – сторонній предмет під ДР; б – вид після вилучення стороннього предмета; в – поперечний розріз ТВЕЛ в області наскрізного дефекту: 1 – оболонка ТВЕЛ; 2 – наскрізний дефект в оболонці ТВЕЛ; 3 – таблетка палива UO_2

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 ядерному 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.

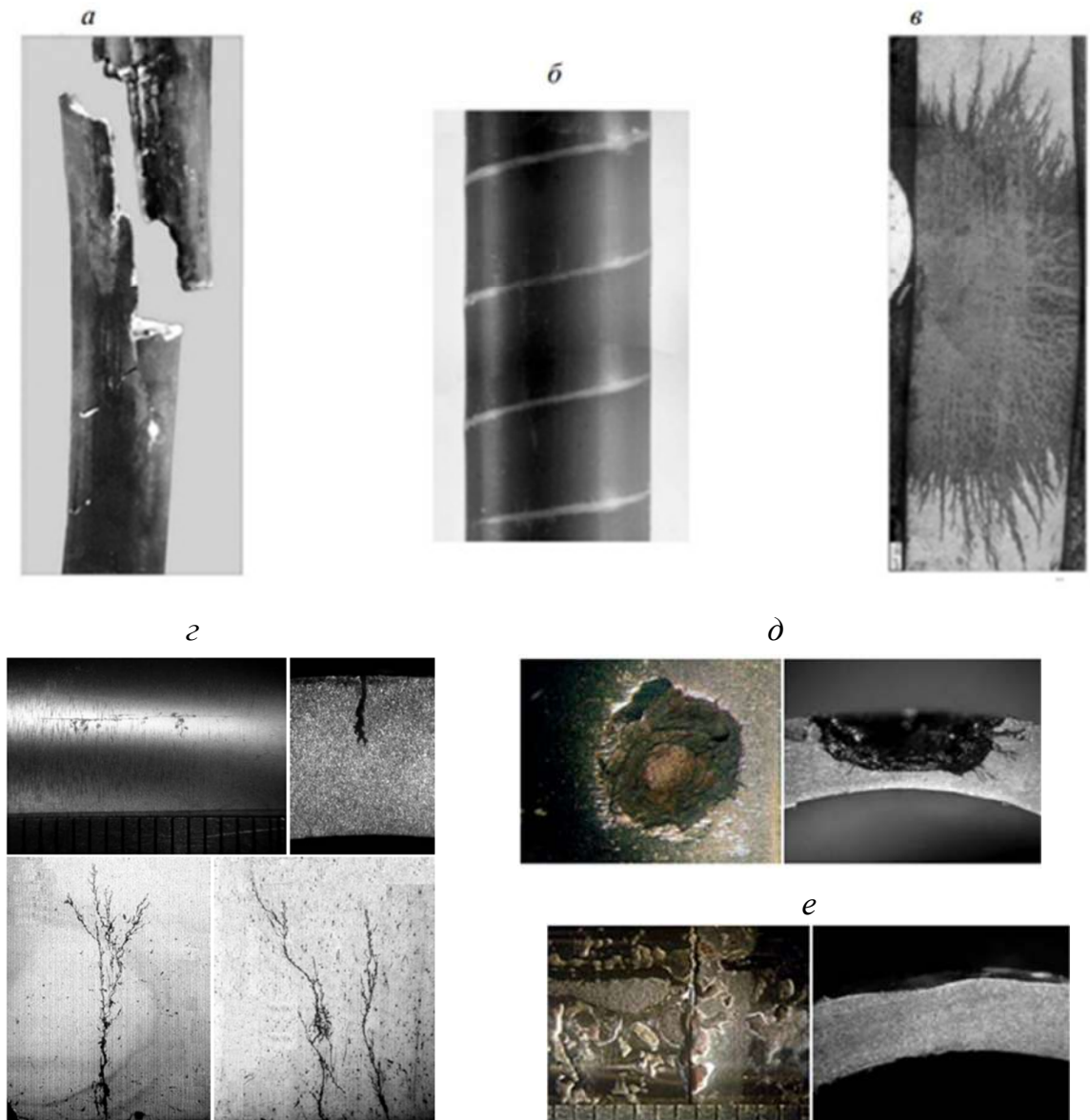


Рис. 1.9. Побічні uszkodження: *a* – руйнування оболонки; *б* – сліди від пружини в газозбірнику; *в* – гідриди в оболонці у місці контакту з пружиною; *г* – корозійне розтріскування під напругою; *д* – пітингова корозія; *е* – плями корозії на поверхні

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 якій 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 вихрострумовому 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.

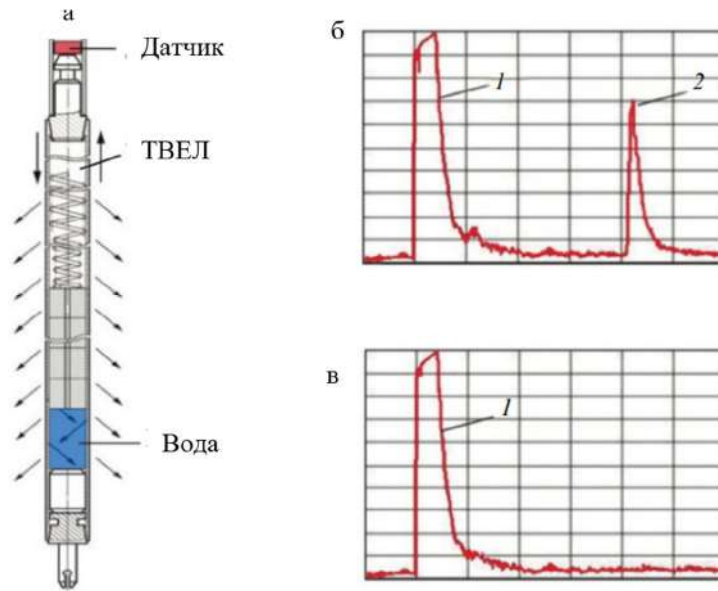


Рис. 1.10. Ультразвуковий метод виявлення негерметичних ТВЕЛів у ТВЗ: а – схематичне зображення датчика та інспектованого ТВЕЛА; б – А-сканограма герметичного ТВЕЛА; в – А-сканограма негерметичного ТВЕЛА; 1 – сигнал збудження датчика; 2 – корисний сигнал.

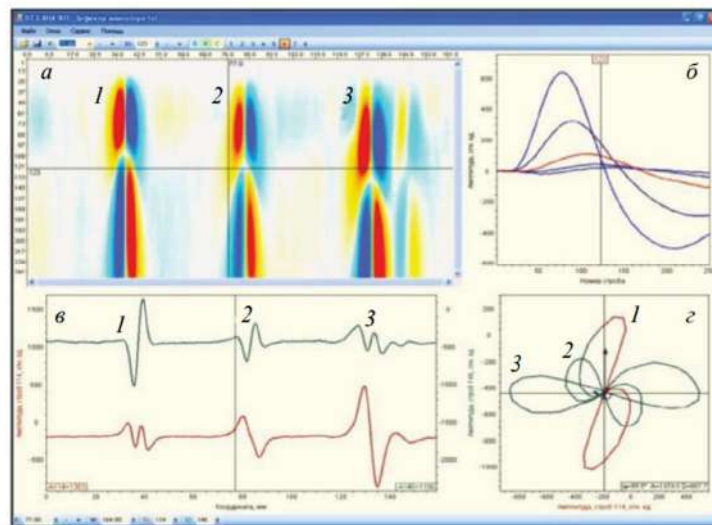


Рис. 1.11. Головне вікно програми з результатами ВТ-контролю фрагмента імітатора із зовнішнім (1), наскрізним (2) та внутрішнім (3) дефектами: а – D-скан; б – А-сканограми в околиці наскрізного дефекту; в – обгинальні сигнали; г – годографи.