

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

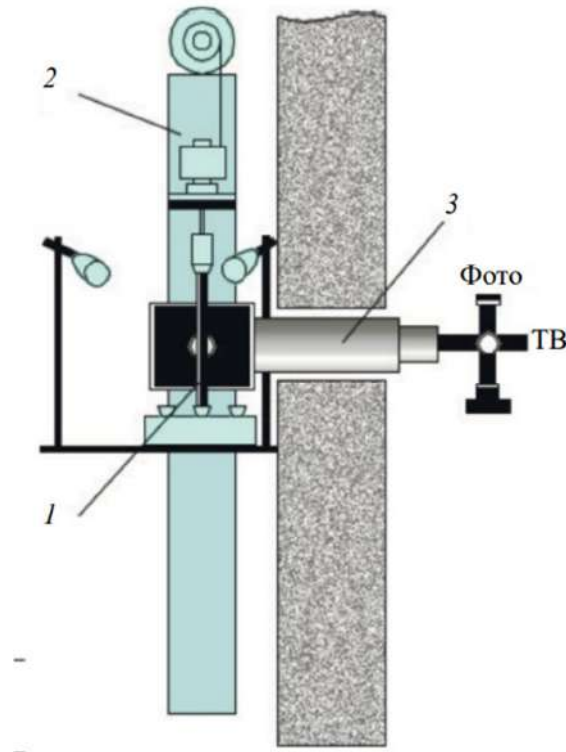


Рис. 1.13. Схема встановлення візуально-оптичної інспекції ТВЕЛ: 1 – ТВЕЛ; 2 – пристрій позиціонування; 3 – перископ.

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.

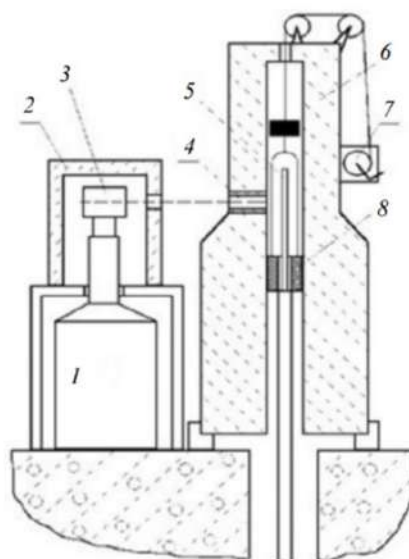


Рис. 1.14. Схема установки для вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання ^{85}Kr у газозбірнику ТВЕЛ: 1 – посуд Дьюара; 2 – свинцевий захист детектора; 3 – детектор; 4 – коліматор; 5 – ТВЕЛ; 6 – захисний контейнер; 7 – підйомний пристрій; 8 – пенал для ТВЕЛ

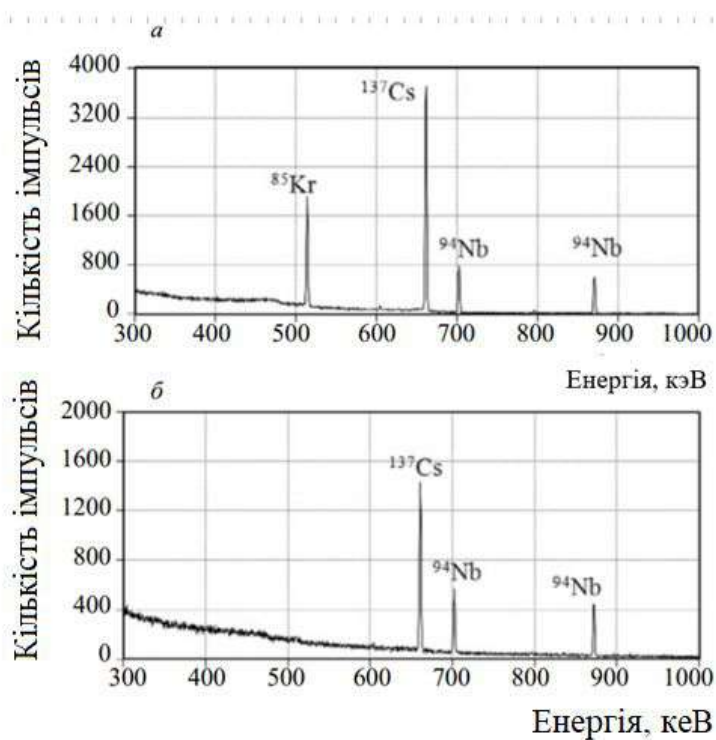


Рис. 1.15. Гамма-спектри газової порожнини герметичного (а) та негерметичного (б) ТВЕЛ.

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].

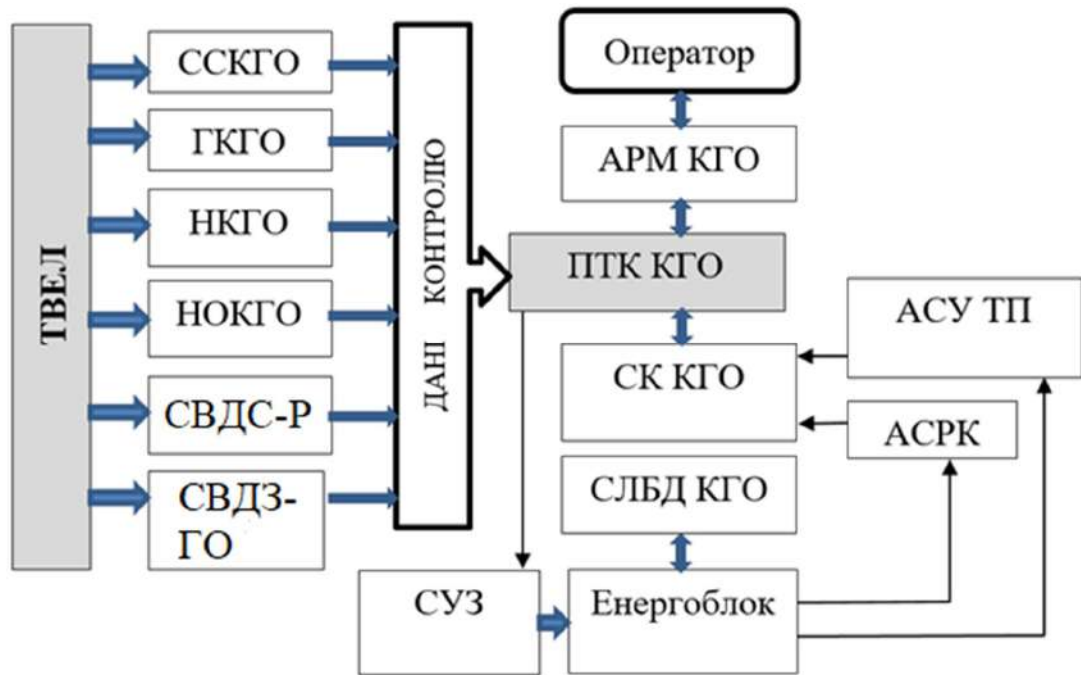


Рис. 1.16. Структурна схема сучасної системи контролю герметичності оболонки ТВЕЛ

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.

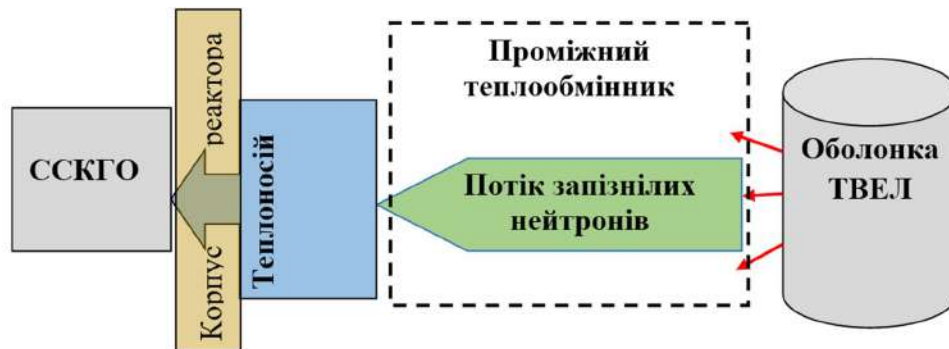


Рис. 1.17. Принцип роботи секторної системи контролю герметичності оболонки



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).

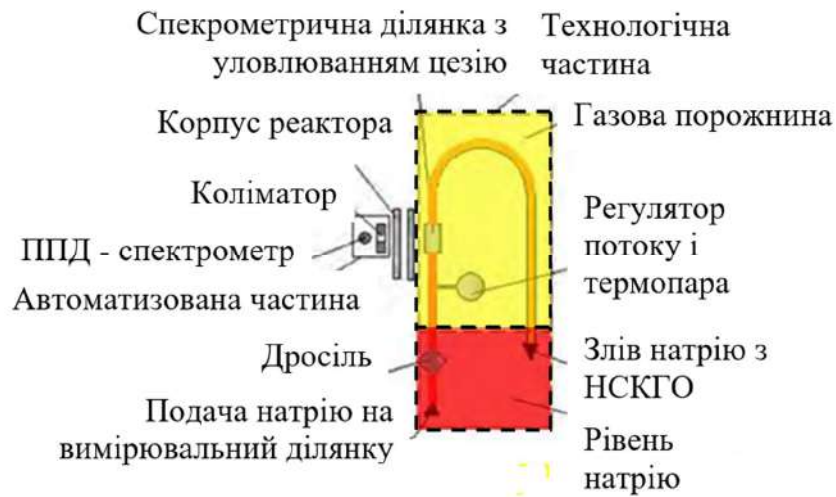


Рис. 1.19. Натрієва система КГО перспективного натрієвого реактора

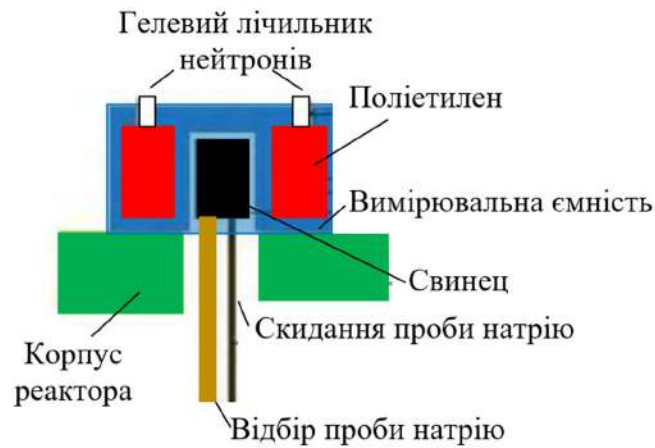


Рис.1.20. Схема системи КГО з поліетиленовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

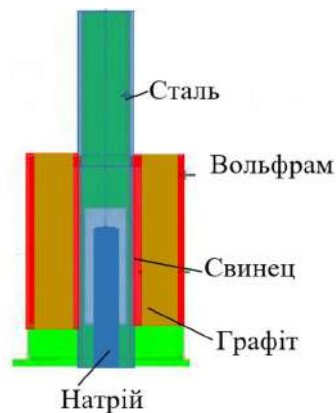


Рис. 1.21. Схема системи КГО з графітовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

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 ЕЛЕМЕНТАУ 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 автотельність 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 полісфорої 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):

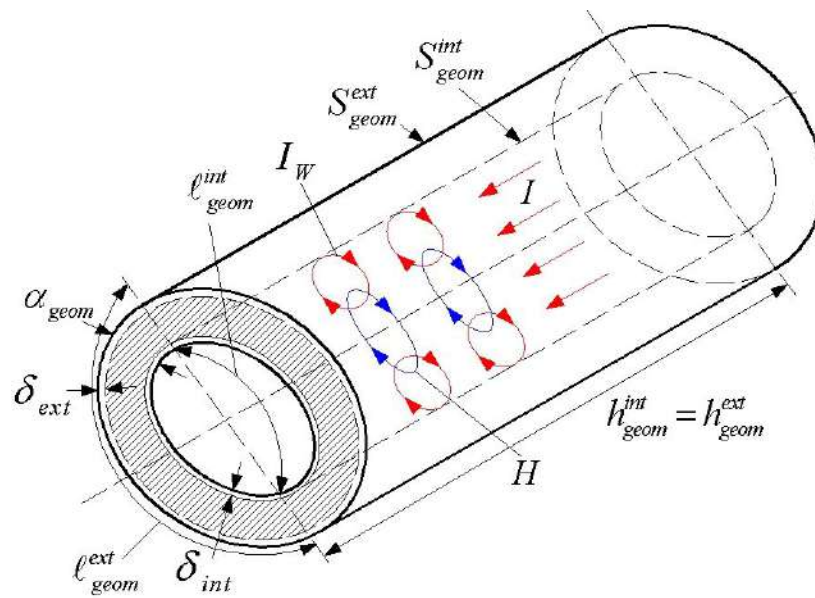


Рис. 2.1. Фізична модель оболонки тепловиділяючого елемента у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра: h_{geom}^{int} – поздовжня геометрична довжина внутрішньої поверхні порожнистого циліндра; h_{geom}^{ext} – поздовжня геометрична довжина зовнішньої поверхні порожнистого циліндра; l_{geom}^{int} – геометрична довжина кола внутрішньої поверхні порожнистого циліндра; l_{geom}^{ext} – геометрична довжина кола зовнішньої 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;