

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДЕЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

© Буданов П.Ф., Хом'як Е.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Буданов Павло Феофанович (Буданов Павел Феофанович, Vudanov Pavlo): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Хом'як Едуард Анатолійович (Хом'як Эдуард Анатольевич, Khomiak Eduard): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2579-2986> ORCID: e-mail: eakhomiak@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті показано, що в сучасних системах контролю герметичності оболонки (КГО) тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ) тепловиділяючої збірки ядерного реактора атомної електростанції, застосовуються різні методи контролю, які мають характерні недоліки, які не дозволяють визначати місцезнаходження, тип та розміри дефектів пошкодження та руйнування на поверхні оболонки ТВЕЛ. Показано, що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік нейтронів, що запізнюються, питома активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ. Виявлено, що для розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу оболонки, як правило, вводяться обмеження та припущення щодо геометричних прирощень, що призводять до наближених і неточних характеристик у використовуваних системах КГО ТВЕЛ, оскільки не враховується структурно-фазовий стан структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, отже 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. Запропоновано в системах КГО ТВЕЛ ядерного реактора, застосувати принципово новий метод контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, з урахуванням сучасних наукових досягнень, на основі використання фрактально – кластерної теорії. Обґрунтовано, що в якості основи, запропонованого методу КГО ТВЕЛ, використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь розгерметизації ТВЕЛ, шляхом визначення місцезнаходження, типу і розміру дефектів пошкодження і руйнування поверхні оболонки ТВЕЛ. Запропоновано для реалізації та застосування фрактального методу контролю, провести удосконалення структурно-функціональної схеми системи КГО ТВЕЛ, шляхом впровадження інформаційно-вимірювального обчислювального модуля виявлення дефектів, який забезпечує обробку даних та їх передачу в автоматизовану систему управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції на основі розроблених етапів алгоритму фрактального методу, 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 ТВЕЛ.

Ключові слова: система контролю герметичності оболонки, тепловиділяючий елемент, фрактальна розмірність, етапи алгоритму фрактального методу

Budanov P., Khomiak E. “Improving the system for monitoring the tightness of the cladding of the fuel element of a nuclear reactor”

The article shows that in modern control systems for the tightness of the shell (KGO) of the heat-releasing element (TVEL) of the heat-releasing assembly of the nuclear reactor at the nuclear power plant, various control methods are used, which have characteristic shortcomings that do not allow determining the location, type and size of damage and destruction defects on the surface of the TVEL shell. It is shown that in all control methods currently used in KGO TVEL systems, only the activity of reference radionuclide groups in the coolant is directly determined: the flow of delayed neutrons, the specific activity of iodine isotopes, and the volume activity of radioactive noble gases, but not the degree of tightness of the shell TVEL. It was found that for the calculations of the assessment criteria of the surface condition of the shell material, as a rule, restrictions and assumptions are introduced regarding geometric increments, which lead to approximate and inaccurate characteristics in the used KGO TVEL systems, since the structural-phase state of the structure of the TVEL shell material is not taken into account, and, therefore, to a decrease in the level of reliability and safety during their operation. It was analyzed that the use of existing methods of controlling the surface of the TVEL shell material to detect surface and internal defects in the form of local heterogeneity, micro- and macropores and various cracks is characterized by low efficiency and seems to be a time-consuming process that requires additional surface treatment of the TVEL shell material. It is proposed to apply a fundamentally new method of controlling the surface quality of the material of the TVEL shell in the KGO TVEL systems of the nuclear reactor, taking into account modern scientific achievements, based on the use of the fractal-cluster theory. It is substantiated that the fractal properties of the structure of the shell material and the quantitative fractal value – the fractal dimension which allows determining the degree of depressurization of the TVEL by determining the location, type and size of the defects of damage and destruction of the surface of the TVEL shell, – are used as the basis of the proposed method of KGO TVEL. For the implementation and application of the fractal method of control, it is proposed to improve the structural and functional scheme of the KGO TVEL system by introducing an information and measurement computing module for detecting defects, which ensures data processing and their transfer to the automated system for controlling the technological processes of the power unit of the nuclear power plant based on the developed stages of the fractal algorithm of the method, in which the sequence of performing measurement and calculation operations for the calculation of fractal dimensionality indicators is defined, to establish the location, type and size of the defect on the axial segments of the TVEL height.

Keywords: shell tightness control system, heat-emitting element, fractal dimension, stages of the fractal method algorithm

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день, при підвищенні потужності ядерного реактора (ЯР) атомної електростанції (АЕС), одним з основних завдань безпеки, є забезпечення контролю стану оболонок ТВЕЛ відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ТВЗ). Таким чином, контроль герметичності оболонок занурюваних відпрацьованих ТВЕЛ ТВЗ, фактично є першим етапом організації управління станом ядерного палива [1,2].

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 ЯР 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 [3-5].

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 систем КГО ТВЕЛ показав, що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік нейтронів, що запізнюються, питома активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ [6-10].

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 [11-15].

У зв'язку з цим, є актуальним, розробити нові методи контролю для систем КГО ТВЕЛ, здатних 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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [16-18], 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 складових активності, викликаних осколковими та активаційними радіонуклідами.

У роботі [19], 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 ТВЕЛ, навіть за відсутності негерметичних ТВЕЛ, що різко впливає на якісні та кількісні показники контролю пошкоджуючих дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

У роботі [20], дається опис проекрованої 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 нейтронах, що запізнюються, і моделюванні розподілу теплоносія по петлях теплообміну. В основі методу лежить принцип індикації витoku продуктів поділу з пошкоджених оболонок ТВЕЛ в теплоносій. В якості реперних радіонуклідів обрані попередники нейтронів, що запізнюються. Осколки поділу – попередники нейтронів, що запізнюються, 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 [21] показано, що для виявлення дефектних ТВС, що містять негерметичні ТВЕЛ, на трубопроводах петель охолодження та на експериментальних петлевих каналах на виході з активної зони, встановлюються детектори нейтронів, що запізнюються (ДЗН), на основі іонізаційних камер поділу. Сигнали ДЗН подаються на вимірвальний 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 ТВС з негерметичними ТВЕЛ, на працюючому ядерному реакторі, дозволяє суттєво звузити область пошуку на зупиненому ЯР АЕС та скоротити час простою.

У роботах [22-24] проведено огляд методів контролю, які застосовують у системах КГО ядерних реакторів АЕС.

До них належать методи руйнуючого та не руйнуючого контролю: капілярні, радіографічні, радіохвильові, маспектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні, вихорострумові дефектоскопії тощо.

Однак даним методам властиві характерні недоліки [25,26]:

- прийняті обмеження та припущення, щодо усереднення геометричних характеристик поверхні матеріалу;
- при накопиченні пошкоджень поверхні, враховується вплив зовнішніх пошкоджувальних 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, що розраховується за граничними умовами, 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.

Метою роботи є удосконалення системи контролю за герметичністю оболонки ТВЕЛ, як підсистеми автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції, для практичного застосування фрактального методу контролю, який підвищить точність та оперативність виявлення розгерметизації ТВЕЛ у порівнянні зі штатною методикою.

Виклад основного матеріалу

Проведемо аналіз сучасних систем контролю герметичності оболонки (КГО) тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ) тепловиділяючої збірки (ТВЗ) ядерного реактора (ЯР) атомної електростанції (АЕС).

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

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 (СКГО 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 системою важливою для безпеки класу ЗН або ЗНУ і входить до складу автоматизованої системи радіаційного контролю (АСРК) 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:

- 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 для подання експлуатаційного 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 вітчизняних і зарубіжних реакторних установок на швидких нейтронах з натрієвим теплоносієм, із застосуванням сучасних спеціалізованих детекторів, блоків детектування, програмно-технічних засобів.

Сучасні системи КГО українських та зарубіжних реакторних установок, включають оперативні та неоперативні системи (підсистеми) КГО, як показано на рис. 1:

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

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 (АСУ ТП) енергоблоку АЕС та автоматизованою системою радіаційного контролю (АСРК);

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.

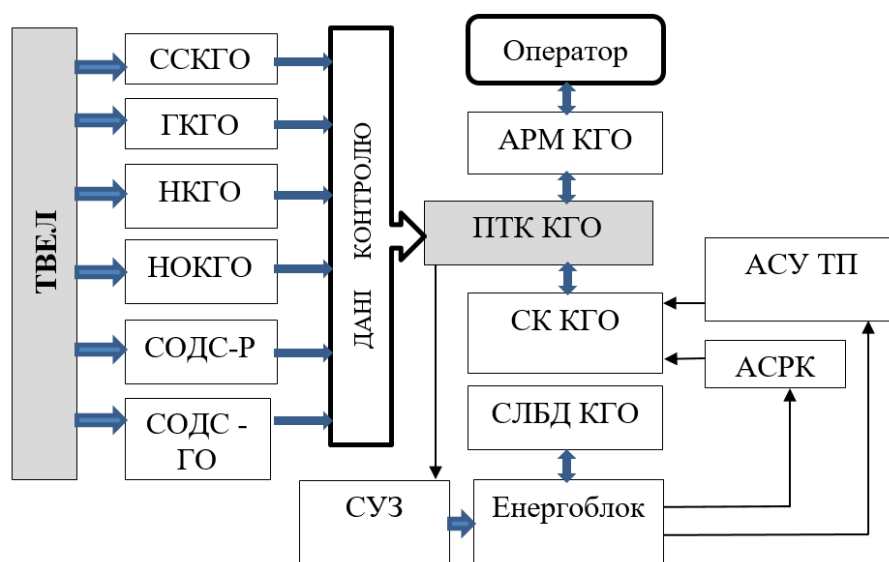


Рис. 1 – Структурна схема сучасної системи контролю герметичності оболонки тепловідділяючого елемента

Розглянемо функції та завдання для виконання вимог, що пред'являються до оперативних підсистем СКГО.

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

- безперервний контроль щільності потоку нейтронів, що запізнюються, від теплоносія (натрію) 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 нейтронів, що запізнюються, по секторах активної зони і сигналів про перевищення контрольних і гранично допустимих значень щільності потоку запізнювальних нейтронів і швидкості її зростання;
- видачу в СУЗ аварійних сигналів при досягненні гранично допустимих значень щільності потоку нейтронів, що запізнюються, і швидкості її зростання.

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 з палива ТВЕЛ.

Для підсистеми ССКГО, розглянемо застосовність методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, заснований на реєстрації нейтронів, що запізнюються, які випускають продукти поділу – попередники запізнювальних нейтронів, що потрапили в теплоносій через дефект в оболонці ТВЕЛ (рис. 2).

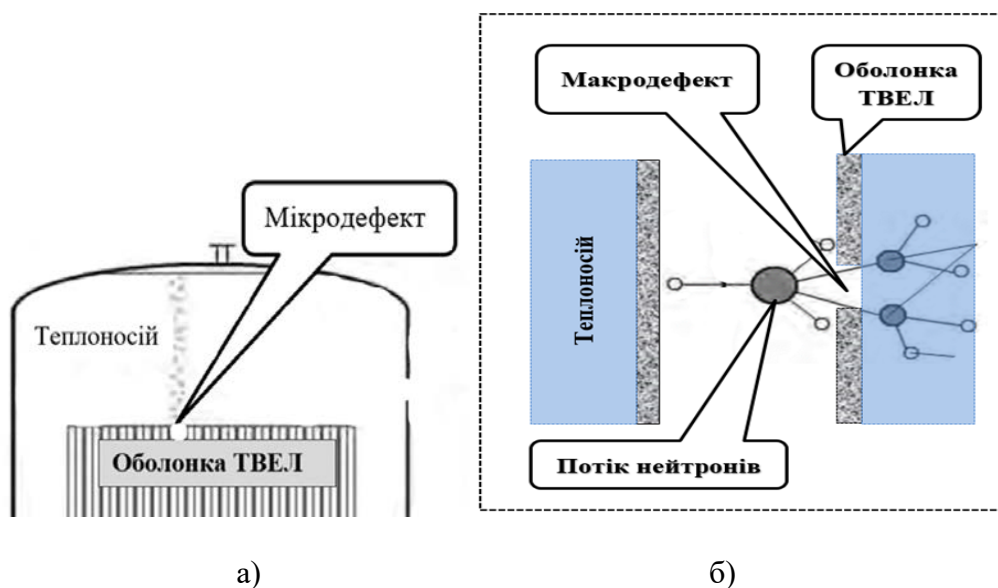


Рис.2 – Дефект типу: а) «газової нещільності»; б) «контакт ядерного палива з теплоносієм»

Розглянемо і проаналізуємо види дореакторного первинного контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, який відбувається перед завантаженням в ядерний реактор АЕС.

Контроль з використанням пробного газу: Пробний газ, як правило гелій, закачують всередину ТВЕЛ. При розгерметизації ТВЕЛ цей газ виходить з під оболонки і однозначно ідентифікує наявність дефекту. Цей метод використовується при виготовленні ТВЕЛ в якості основного методу контролю герметичності готових виробів. Реєстрацію витоку пробного газу проводять мас-спектрометричним детектором.

Контроль ультразвуковим методом: Принцип використання полягає в тому, що інтенсивність ультразвукових коливань, які пройшли через внутрішню порожнину ТВЕЛ (в області компенсаційного обсягу), пропорційна квадрату тиску газу, який в ньому знаходиться. Фірма KWU застосовує ультразвуковий контроль для виявлення негерметичних ТВЕЛ, газозбірник яких заповнений водою. Рівень сигналу від випромінюючого перетворювача до приймача зменшується при наявності води в газозбірнику. Також застосовується ультразвукове сканування поверхні ТВЗ в пеналах КГО.

Метод візуального контролю: Проводиться із застосуванням перископів, ендоскопів, кінокамер і телевізійних систем. Застосовується для ТВЗ ядерних реакторів, що мають безчехлову конструкцію і невелику кількість ТВЕЛ в пучках, також широко використовується в гарячих камерах.

Розглянемо та проаналізуємо види реакторного контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, який відбувається при працюючому ядерному реакторі АЕС.

Специфічна особливість рішення задачі системи КГО на АЕС, полягає у відсутності прямого доступу до ТВЕЛ, тому висновок про порушення цілісності оболонки ТВЕЛ робиться побічно, за наявності продуктів поділу ядерного палива в теплоносії або газовій порожнині реактора ТВЕЛ. Періодичний контроль герметичності оболонок ТВЕЛ на працюючому реакторі типу ВВЕР здійснюється відбором проб теплоносія раз на місяць. При підозрі про наявність дефектної ТВЗ відбір проб проводиться раз на добу. Контроль проводиться по ^{131}I (йод). У даного ізотопу період напіврозпаду становить 8 діб, що дає час на проведення якісного виміру його активності.

Розглянемо і проаналізуємо сучасні методи КГО, які застосовуються для більшості типів реактора АЕС.

Метод контролю за активністю продуктів поділу в газовій порожнині реактора

У разі утворення мікрodefektів в оболонці ТВЕЛ, газоподібні продукти поділу, виходять з-під оболонки і накопичуються в газовій порожнині. На наступній стадії розгерметизації (контакт ядерного палива з теплоносієм) стає помітним вихід в теплоносії короткоживучих продуктів поділу. Таким чином, система контролю продуктів поділу в газовій порожнині дозволяє відстежувати процес утворення дефекту оболонки ТВЕЛ на ранній стадії.

Метод контролю бета і гамма-активності теплоносія. Контроль здійснюється безпробовідбірним методом за допомогою радіометричної і спектрометричної апаратури. Зокрема, в складі комплексу апаратури контролю радіаційної безпеки (АКРБ) на АЕС з реакторами ВВЕР для цієї мети є пристрої детектування питомої активності йоду і криптону в теплоносії першого контуру, а також потоку запізнілих нейтронів з теплоносія в діапазоні від 10 до 1000 н/см²·с. Інформація цих пристроїв дозволяє контролювати стан оболонок ТВЕЛ працюючого реактора і стежити за динамікою їх розгерметизації. АКРБ дозволяє контролювати герметичність ТВЕЛ, але одержувана при цьому інформація дозволяє встановити тільки факт розгерметизації без визначення місцезнаходження пошкодженого ТВЕЛ. Однак за результатами вимірювання АКРБ можна встановити ступінь розгерметизації ТВЕЛ і прийняти рішення про можливість або неможливість експлуатації реактора АЕС.

Метод контролю за запізнілими нейтронами. Труднощі застосування методу контролю за запізнілими нейтронами полягає в тому, що при активації кисню утворюється ізотоп азоту $^{16}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$. Таким чином, ядра ^{17}N , перебуваючи в збудженому стані, зазнають розпаду і випускають запізнілі нейтрони, що спотворює результати вимірювання. Для вирішення даної проблеми застосовується буферна ємність, яка затримує теплоносії на 60 секунд. За цей час ядра азоту зазнають розпад. В результаті з'являється можливість

реєстрування запізнілих нейтронів від ізотопів I і Br. При установці системи КГО на кожному з головних циркуляційних петель стає можливим визначення сектора розташування дефектної ТВЕЛ.

В даний час цю систему замінили на систему контролю за гамма випромінюванням. На кожній циркуляційній петлі встановлюються датчик γ -випромінювання і спектрометри. Труднощі експлуатації даної системи полягають в тому, що при опроміненні кисню утворюється ізотоп ^{16}N з періодом напіврозпаду 7,1 секунд.

Мінімізувати його вплив на показання за допомогою буферної ємності досить важко, тому створюються електронні схеми для усунення даної проблеми. На ядерному реакторі дана проблема вирішується за допомогою методу співвідношення.

Основними нуклідами, попередниками запізнілих нейтронів, які надходять в теплоносій з негерметичних ТВЕЛ, є ізотопи бром і йоду. Для реєстрації запізнілих нейтронів на реакторах використовуються спеціалізовані датчики. На методі контролю за запізнілими нейтронами заснований принцип роботи ССКГО.

Метод контролю герметичності, заснований на реєстрації запізнілих нейтронів, які випускають продукти поділу – попередники запізнілих нейтронів, що потрапили в теплоносій через дефект в оболонці ТВЕЛ, показаний на рис. 3.

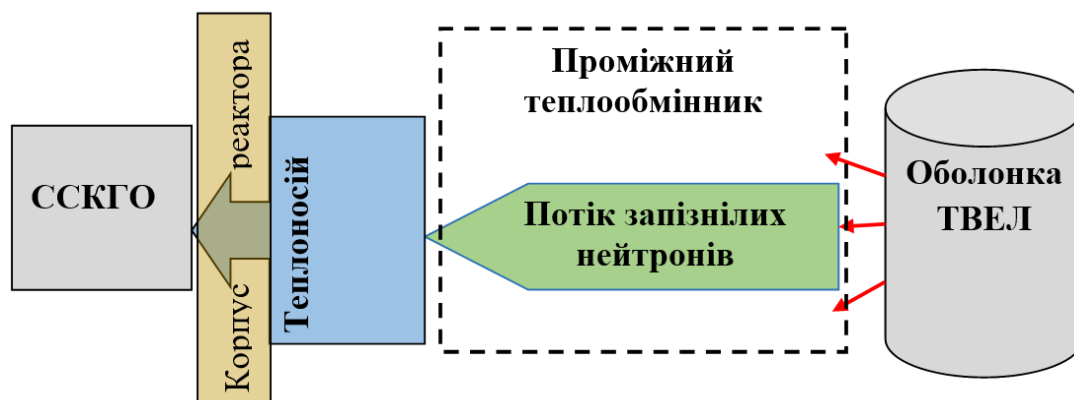


Рис. 3 – Принцип роботи секторної системи контролю герметичності оболонки

В якості детекторів запізнілих нейтронів у сучасних системах КГО, використовуються підвіски з іонізаційними камерами ділення, які розміщуються в блоках детектування (БД). Блоки детектування розміщуються або навпаки у вхідних вікнах проміжних теплообмінників в шахті реакторів бакового типу (БТ) або на трубопроводах першого контуру для корпусних реакторів. Для розміщення підвісок іонізаційних камер ділення (ПІК), призначений блок детектування, а також захисту іонізаційних камер від фонового гамма-випромінювання і підвищення чутливості реєстрації запізнілих нейтронів за рахунок їх уповільнення на матеріалах стінок БД. Для підвищення відмовостійкості секторної системи КГО використовувалися модернізовані БД, які дозволяють додатково знизити вплив фонового нейтронного випромінювання на показання ПІК.

Схема БД секторної системи КГО по запізнілих нейтронах реактора БН-800 представлена на рис. 4. Крім того, кількість підвісок в кожному БД збільшено з двох до трьох ПІК, відповідно застосовані три незалежні гілки реєстрації сигналів від попередників запізнілих нейтронів з мажоритарною схемою формування аварійного сигналу в СУЗ.

Недоліком даного методу можна вважати те, що сукупність дрібних дефектів може створити таку ж діагностичну картину, як один великий.



Рис. 4 – Розташування блоків детектування ССКГО БН-800 і БН-600

Метод контролю з використанням пеналів КГО. Метод застосовується на зупиненому реакторі і дозволяє однозначно ідентифікувати дефектні ТВЕЛ і ТВЗ. В основу покладено принцип реєстрації активності продуктів поділу, що виходять через дефект в оболонці пошкодженого ТВЕЛ в вимірвальний об'єм пенала. Відпрацьована ТВЗ поміщається в герметичний пенал, у який подається вода.

Мікродефекти визначаються активністю газоподібних продуктів поділу, що виходять через дефект в газову порожнину пенала. Для інтенсифікації виходу газоподібних продуктів поділу, ТВЗ витримується в газовому середовищі пенала певний час з метою розігріву палива за рахунок залишкового тепловиділення.

Дефекти типу «прямий контакт з теплоносієм» діагностуються по активності продуктів поділу в воді. Критерієм наявності дефекту оболонки ТВЕЛ є перевищення результатів вимірювання встановлених меж.

Метод контролю з використанням пеналів КГО реалізується в такий спосіб. На реакторі ВВЕР-1000 знаходиться 4 герметичних пенала, розташованих в касетному відсіку басейну витримки.

Ці пенали, вміщують по одній ТВЗ та оснащені герметичною кришкою, яка закривається дистанційно. Завантаження і вивантаження ТВЗ в пенали проводиться переважувальною машиною під шаром води. ТВЗ поміщають у пенал, заповнений водою, і створюють надлишковий тиск. При наявності в оболонці ТВЕЛ дефекту, вода при підвищеному тиску надходить в зазор між оболонкою і паливом.

Деякий час тиск підтримують підвищеним, при цьому вода в зазорі під оболонкою насичується продуктами поділу. Потім тиск скидають, і «настояна» вода виходить в пенал, збільшуючи концентрацію продуктів поділу в воді пенала.

З пенала відбирають пробу води і визначають в ній концентрацію реперних нуклідів ^{131}I або ^{137}Cs . Виходи цих нуклідів з негерметичного ТВЕЛ в теплоносії працюючого реактора і в воду пенала пропорційні, тому визначення їх концентрації у воді пенала дозволяє судити про ступінь негерметичності оболонки і визначити мінімальну кількість ТВЗ, яке повинно бути видалено з активної зони реактора, щоб концентрація продуктів поділу в теплоносії не перевищувала допустимого значення.

Штатна система поканального КГО ТВЕЛ складається з 8 незалежних паралельних гілок, які обслуговують 4 барабана-сепаратора (БС) – по 2 гілки на один барабан сепаратор. Кожна гілка системи містить спеціальний візок з рейками, на якому закріплені вимірвальні датчики. При переміщенні візка вздовж гілки проводиться вимірювання активності теплоносія по γ -випромінюванню продуктів поділу та продуктів корозії.

Реєстрація та вивід сигналів системі поканального контролю ТВЕЛ проводиться в аналоговій формі протягом близько 30 хвилин після включення. При стабільному радіаційному стані активної зони реактора профілактичний поканальний контроль всіх ТВЗ в активній зоні реактора проводиться два рази на місяць.

Селекторний метод контролю. Для локалізації дефектних ТВЗ на реакторі ВВЕР застосовується селекторний метод. Активність теплоносія вимірюється послідовно на виході з кожного каналу у відповідних оптимальних енергетичних діапазонах спеціальним детектором, який у свинцевому захисті з колімаційними отворами переміщується автоматизованою системою уздовж технологічного ряду трубопроводів пароводяних комунікацій зліва і праворуч від кожного барабана-сепаратора. Перевищення значень активності заданої уставки є критерієм негерметичності ТВЕЛ в даному каналі, і оператор дає команду на вивантаження дефектної ТВЗ з реактора. За допомогою системи трубопроводів з кожної ТВЗ або з групи ТВЗ здійснюється відбір проби теплоносія. Проводиться спектрометричний аналіз проб і робиться висновок про виявлення дефектних ТВЕЛ. Даний метод застосовується також при визначенні місця розташування дефектних ТВЗ.

Для французького реактора ASTRID, робота системи КГО організована таким чином: відбір проби натрієвого теплоносія, проводиться над кожної ТВЗ, за допомогою пробовідбірних ліній і подається всередину вимірювальної ємності блоку детектування (рис. 5).

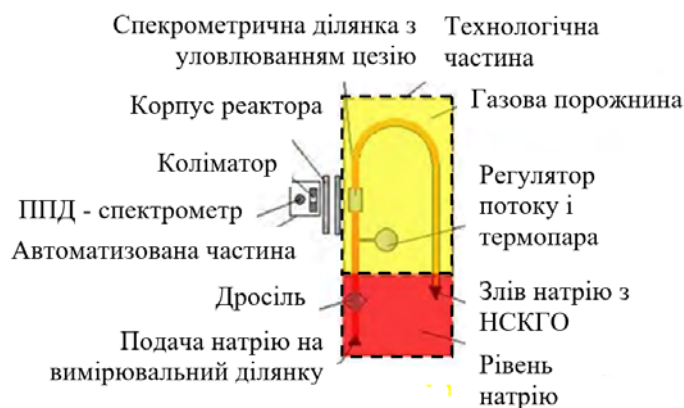


Рис. 5 – Натрієва система КГО перспективного натрієвого реактора

Вимірювальна ємність БД (об'ємом близько 3 літрів) оточена декількома сантиметрами свинцевою захисту і поліетиленовим сповільнювачем (рис. 6). В якості чутливих елементів вимірювальних каналів, використовуються гелієві пропорційні лічильники. Блоки детектування розташовані на корпусі ядерного реактора.

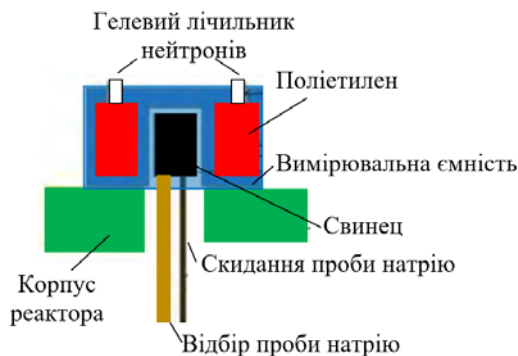


Рис.6 – Схема системи КГО з поліетиленовим сповільнювачем нейтронів в французькому реакторі ASTRID

В якості сповільнювача нейтронів для блоку детектування пропонується також використання графіту (рис. 7), так як в результаті його застосування, виключається утворення фотонейтронів, які вносять свій внесок в показання вимірвальних каналів системи КГО.

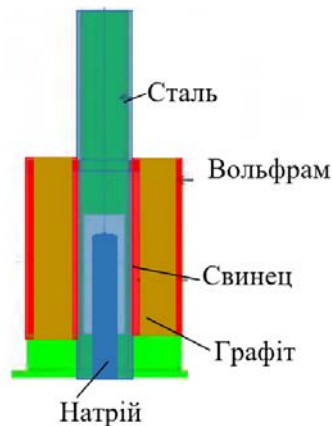


Рис.7 – Схема системи КГО з графітовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

Водно-газовий метод контролю КГО на ВВР. На зарубіжних АЕС з реакторами типу ВВР в рамках методу з використанням пеналів КГО застосовується водно-газовий метод контролю. При проведенні КГО ТВЕЛ використовується повнопотоковий дегазатор, в який надходить вода з пенала, і де вона дегазується методом розпилення в повітряному середовищі. Виділення інертних радіоактивних газів (ІРГ) з води пенала може здійснюватися і за рахунок барботажа, для чого стиснене повітря подається в нижній патрубок пенала. Виділений з пенальної води, газ подається в проточний бета-радіометр, де проводиться вимір радіоактивності надходженого газового середовища. Недоліком методу є зниження точності за рахунок поверхневого забруднення ТВЕЛ радіонуклідами і великих часових витрат на проведення контролю.

Розглянемо удосконалення системи контролю за герметичністю оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючої збірки ядерного реактора типу ВВЕР-1000.

Зроблений аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ 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, «пояса», великі шлакові вclusions, дрібні тріщини і неметалеві вclusions 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 [27-28]. Тому, в роботі запропоновано, для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки при її пошкодженні і руйнуванні, доцільність застосування розрахункового апарату, заснованого на методі теорії фракталів [29].

В якості основи, пропонованого 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 заповнювання об'єму структури матеріалу оболонки при розгерметизації ТВЕЛ [30, 31].

Для оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, розглянемо опис базового методу фрактально-кластерної теорії (МФКТ). Необхідно розглянути відмінні риси пропонованого 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 системи КГО АСУ ТП енергоблоку АЕС.

У роботі, для реалізації та застосування фрактального методу контролю, було розроблено варіант структурно-функціональної схеми удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, яка включає до структурного складу – інформаційно-вимірювальний обчислювальний модуль виявлення дефектів, який забезпечить обробку даних та їх передачу до автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції (АСУ ТП енергоблоку АЕС) на пульт автоматизованого робочого місця оператора (АРМо), як показано на рис. 8.

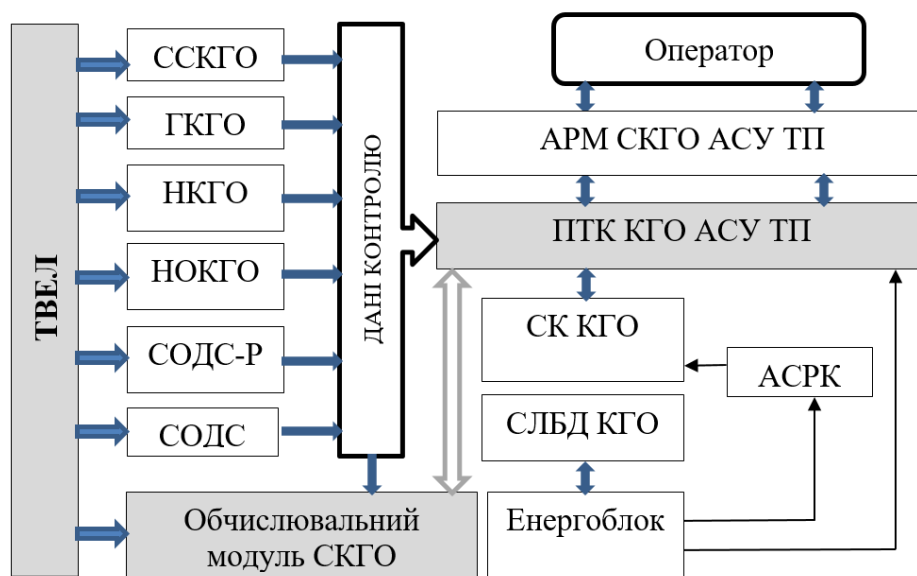


Рис. 8 – Структурна схема удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента

При цьому, необхідно розробити і реалізувати алгоритм виконання запропонованого автоматизованого фрактального методу в складі математичного забезпечення автоматизованої системи оперативного контролю (АСОК) якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Для практичної реалізації фрактального методу контролю в системах КГО ТВЕЛ та забезпечення функціонування інформаційно-обчислювального модуля виявлення дефектів ТВЕЛ, у роботі була розроблена та запропонована блок-схема алгоритму (рис. 9), яка дозволяє:

– визначити показники фрактальної розмірності контуру дефектів на аксіальних сегментах висоті пошкодженої оболонки ТВЕЛ;



Рис. 9 – Блок-схема алгоритму застосування фрактального методу СКГО ТВЕЛ

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

– обробляти дані в режимі реального часу;

– 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 КГО у складі системи АСУ ТП енергоблоку АЕС, включає наступні етапи (рис. 9):

Етап №1: Вибір початкових умів;

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

Етап №3: Попередня обробка даних структури 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 аксіальній 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 негерметичного ТВЕЛ;

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

Етап №8: Подання інформації з підсистеми АСОК до системи АСУ ТП 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, а також подання інформації з підсистеми АСКО до системи АСУ ТП енергоблоку АЕС на автоматизоване робоче місце оператора-інженера АСУ, для оцінки ступеня герметичності або розгерметизації ТВЕЛ у складі тепловідляючої збірки, для вироблення рішення на керування режимами роботи ядерного реактора АЕС.

Висновки

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

– удосконалено структурно-функціональну схему системи КГО, як підсистеми АСУ ТП енергоблоку АЕС.

– для визначення пошкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ, запропоновано застосовувати спеціальний інформаційно-обчислювальний модуль системи КГО, для поєднання програмного забезпечення АСУ ТП енергоблоку АЕС.

– розроблено блок-схему алгоритму, для виконання запропонованого автоматизованого методу КГО у складі математичного забезпечення АСОК, для забезпечення контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ;

– 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.

Список використаних джерел:

1. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском : НП 306.2.143-2008 : затвердж. наказом Держатомрегулювання від 15.04.2008 №73 : зареєстр. Мін'юстом 09.06.2008 за № 521/15203. – Київ : ДКЯРУ, 2008. – 52 с.
2. Загальні положення безпеки атомних станцій : НП 306.2.141-2008 : затвердж. наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 №162 : зареєстр. Мін'юстом 25.01.2008 за № 56/14747. – Київ : ДКЯРУ, 2008. – 226 с.
3. Современные системы КГО перспективных реакторов на быстрых нейтронах / П. А. Дворников [и др.] // *Аппаратура и новости радиационных измерений*. – 2017. – № 2. – С. 2–12.
4. Богомоллов В. Н. Алгоритм бездемонтажной проверки измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реакторов типа БН / В. Н. Богомоллов // *Аппаратура и новости радиационных измерений*. – 2018. – № 1. – С. 115–120.
5. Албутова О. И. Исследование зависимости показаний секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-600 от эксплуатационных параметров / О. И. Албутова, Д. А. Лукьянов // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. – 2015. – № 2. – С. 32–38.
6. Parga C. J. Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element / C. J. Parga, I. J. Rooyen, E. P Luther // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – Vol. 512. – P. 252–267. doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.028
7. A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods / J. Tang [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2017. – Vol. 110. – P. 492–500. doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.061.
8. Pelykh S. N. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control [Electronic resource] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, V. E. Baskakov // *Annals of Nuclear Energy*. – 2013. – Iss. 58. – P. 188–197. – Access mode : <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6963>.
9. Yong S. Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants / S. Yong, Z. Linzi // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2022. – Vol. 163. – P. 438–452. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.039>.
10. Philip B. A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins [Electronic resource] / B. Philip // *Journal of Computational Physics*. – 2015. – Vol. 286. – P. 143–171. – Access mode : <https://bit.ly/3fV5SET>.
11. Zheng Y. Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method / Y. Zheng // *Applied Mathematical Modelling*. – 2020. – Vol. 88. – P. 437–460. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.06.060>.
12. Hyung M. S. Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery / M. S. Hyung, Y. S. Kune // *Progress in Nuclear Energy*. – 2011. – Vol. 53, iss. 7. – P. 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.026>.
13. Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation / R. K. Abdul, R. A. Afzal, A. D. Mohammed, M. K. Ramis // *Progress in Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 111. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.013>.
14. Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs) / R. J. Belles // *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. – 2nd edn. – 2021. – P. 95–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823916-2.00005-9>
15. CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor / X. Shuang, Z. Xuhua, H. Gaojie, C. Xiabin // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 53, iss. 9. – P. 2847–2858. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.03.028>
16. Experience of commissioning of the sectoral monitoring tightness system of fuel elements claddings (SSKGO) of RF BN-600, RF BN-800 / P. A. Dvornikov, V. N. Bogomolov, S. N. Kovtun, A. A. Kudryaev // *Book of Abstracts International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)*. – 2017. – P. 82.
17. Скоморохов А. О. Применение метода перекомпенсации для определения местоположения негерметичных сборок в реакторах на быстрых нейтронах / А. О. Скоморохов, Д. А. Лукьянов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2007. – № 2. – С. 39–43.
18. Локализация дефектных ТВС в активной зоне реактора БН+600 с помощью секторной системы КГО / А. С. Жилкин [и др.] // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2011. – № 1. – С. 83–91.
19. Питання контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів із впровадження нових видів ядерного палива на атомних станціях України з реакторами ВВЕР-1000 / В. І. Богорад, Т. В. Литвинська, А. В. Носовський, О. Ю. Слєпченко // *Ядерна та радіаційна безпека*. – 2014. – № 1 (61). – С. 29–33.

20. Курский А. С. Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на корпусном кипящем реакторе ВК-50 / А. С. Курский, В. В. Калыгин, И. И. Семидоцкий // *Вестник ИГЭУ*. – 2014. – № 1. – С. 1–6.
21. Методы локализации дефективных ТВС в реакторе МБИР / П. А. Дворников, Д. А. Лукьянов, С. Н. Ковтун, С. С. Шутов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2013. – № 3. – С. 24–34.
22. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елемента для підвищення безпеки ядерного реактора / К. Ю. Бровко, П. Ф. Буданов, Е. А. Хом'як, О. А. Тимошенко // *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.
23. Коновалов И. И. Выявление факторов ускоренного накопления повреждений в оболочках ТВЭЛов, облученных в реакторе БН-600, неразрушающими методами контроля / И. И. Коновалов, В. В. Чуев, К. В. Митюрев // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2011. – № 2. – С. 171–180.
24. Воробьев Ю. Ю. Оценка применимости модели деформации оболочек ТВЭЛов для топлива реакторов ВВЭР-1000 / Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин // *Ядерная та радіаційна безпека*. – 2015. – № 3. – С. 3–7.
25. Разработка метода контроля оболочки ТВЕЛ для повышения безопасности ядерного реактора / П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, С. Ф. Жуков, Е. А. Хом'як // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. Серія: *Технічні науки*. – 2021. – Т. 32 (71), ч. 2, № 2. – С. 49–54.
26. Сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента / Е. А. Хом'як, П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, І. Г. Кирисов // *Вісник ВПІ*. – 2022. – Вип. 3. – С. 11–16.
27. Федер Е. Фракталы [Электронный ресурс] / Е. Федер ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : УРСС : Ленанд, 2014. – 256 с. – Режим доступа : <http://www.prometeus.nsc.ru/acquisitions/15-04-14/cont01.ssi> (дата обращения 20.06.22).
28. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М. ; Ижевск : Ижев. ин-т компьютер. исслед., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 656 с.
29. Балханов В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления [Электронный ресурс] / В. К. Балханов ; отв. ред. Ю. Б. Башкуев. – Улан-Удэ : Изд-во Бурят. госун-та, 2013. – 224 с. – Режим доступа : <http://ipms.bsnet.ru/publications/src/2013/FractGeomet.pdf> (дата звернення 20.06.22).
30. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / P. Budanov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – № 3/8 (111). – P. 75–89.
31. Development of a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear / P. Budanov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – № 4 (8 (118)). – P. 60–70.

References:

1. Derzhatomrehulivannia 2008, *Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom* : NP 306.2.143-2008, Derzhavnyi komitet yadernoho rehulivannia Ukrainy, Kyiv.
2. Derzhatomrehulivannia 2008, *Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii* : NP 306.2.141-2008, Derzhavnyi komitet yadernoho rehulivannia Ukrainy, Kyiv.
3. Dvornikov, PA, Kovtun, SN, Kudriaev, AA, Lukianov, SS & Shutov, SS 2018, 'Sovremennyye sistemy KGO perspektivnykh reaktorov na bystrykh neitronakh', *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, no. 2, pp. 2-12.
4. Bogomolov, VN 2018, 'Algoritm bezdemontazhnoi proverki izmeritelnykh kanalov sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktorov tipa BN', *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, no. 1, pp. 115-120.
5. Albutova, OI & Lukianov, DA 2015, 'Issledovanie zavisimosti pokazanii sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktora BN 600 ot ekspluatatsionnykh parametrov', *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 32-38.
6. Parga, CJ, Rooyen, IJ & Luther, EP 2018, 'Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element', *Journal of Nuclear Materials*, no. 512, pp. 252-267.
7. Tang, J, Huang, M, Zhao, Y, Ouyang, X & Huang, J 2017, 'A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods', *Annals of Nuclear Energy*, vol. 110, pp. 492-500.
8. Pelykh, SN, Maksimov, MV & Baskakov, VE 2013, 'Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control', *Annals of Nuclear Energy*, iss. 58, pp. 188-197.
9. Yong, S & Linzi, Z 2022, 'Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants', *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 438-452.
10. Philip, B 2015, 'A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins', *Journal of Computational Physics*, vol. 286, pp. 143-171.
11. Zheng, Y 2020, 'Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method', *Applied Mathematical Modelling*, vol. 88, pp. 437-460.

12. Hyung, MS & Kune, YS 2011, 'Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery', *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53(7), pp. 825-830.
13. Abdul, RK, Afzal, RA, Mohammed, AD & Ramis, MK 2019, 'Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation', *Progress in Nuclear Energy*, vol. 111, pp. 1-14.
14. Belles, RJ 2021, 'Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs)', *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*, 2nd edn, pp. 95-115.
15. Shuang, X, Xuhua, Z, Gaojie, H & Xiabin, C 2021, 'CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor', *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53(9), pp. 2847-2858.
16. Dvornikov, PA, Bogomolov, VN, Kovtun, SN & Kudryaev, AA 2017, 'Experience of commissioning of the sectoral monitoring tightness system of fuel elements claddings (SSKGO) of RF BN-600, RF BN-800', *Book of Abstracts International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)*, pp. 82.
17. Skomorokhov, AO & Lukianov, DA 2007, 'Primenenie metoda perekompensatsii dlia opredeleniia mestopolozheniia negermetichnykh sborok v reaktorakh na bystrykh neutronakh', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 39-43.
18. Zhilkin, AS, Gurev, SA & Osipov, SL 2011, 'Lokalizatsiia defektnykh TVS v aktivnoi zone reaktora BN 600 s pomoshchiu sektornoii sistemy KGO', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 1, pp. 83-91.
19. Bohorad, VI, Lytvynska, TV, Nosovskyi, AV & Slepchenko, OYu 2014, 'Pytannia kontroliu hermetychnosti obolonok teplovydilnykh elementiv iz vprovadzheniia novykh vydiv yadernoho palyva na atomnykh stantsiiakh Ukrainy z reaktoramy VVER-1000', *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no. 1(61), pp. 29-33.
20. Kurskii, AS, Kalygin, VV & Semidotskii, II 2014, 'Metody kontroliu germetichnosti obolochek teplovydeliiaushchikh elementov na korpusnom kipiaschem reaktore VK-50', *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, no. 1, pp. 1-6.
21. Dvornikov, PA, Lukianov, DA, Kovtun, SN & Shutov, SS 2013, 'Metody lokalizatsii defektivnykh TVS v reaktore MBIR', *Izvestiia vuzov. Iadernaia energetika*, no. 3, pp. 24-34.
22. Budanov, PF, Brovko, KYu, Khomiak, EA & Tymoshenko, OA 2020, 'Udoskonalennia metodu kontroliu obolonky teplovydilnogo elementa dlia pidvyshchennia bezpeky yadernoho reaktora', *Visnyk Kharkivskoho politekhnichnogo instytutu*, no. 1, pp. 26-31.
23. Konovalov, II, Chuev, VV & Mitiurev, KV 2011, 'Vyavlenie faktorov uskorennoho nakopleniia povrezhdenii v obolochkakh TVELov obluchennykh v reaktore BN-600 nerazrushaiushchimi metodami kontroliu', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 171-180.
24. Vorobev, Iulu & Zhabin, OI 2015, 'Otsenka primenimosti modeli deformatsii obolochek TVELov dlia topliva reaktorov VVER-1000', *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no. 3, pp. 3-7.
25. Budanov, PF, Brovko, KYu, Zhukov, SF & Khomiak, EA 2021, 'Rozrobka metodu kontroliu obolonky TVEL dlia pidvyshchennia bezpeky yadernoho reaktora', *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni VI Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*, vol. 32 (71), part 2, no. 2, pp. 49-54.
26. Khomiak, EA, Budanov, PF, Brovko, KYu & Kyrsov, IH 2022, 'Suchasni pidkhody ta vymohy do metodiv kontroliu hermetychnosti obolonky teplovydilnogo elementa', *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, iss. 3, pp. 11-16.
27. Feder, E 2014, *Fraktalyi*, 2nd edn, URSS, Lenand, Moskva.
28. Mandelbrot, B 2010, *Fraktalnaya geometriya prirody*, Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy, Nauchno-issledovatel'skiiy tsentr Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, Moskva, Izhevsk.
29. Balkhanov, VK 2013, *Osnovy fraktalnoj geometrii i fraktalnogo ischisleniya*, Izdatel'stvo Buryatskogo gosuniversiteta, Ulan-Ude.
30. Budanov, P, Kyrsov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 3/8 (111), pp. 75-89.
31. Budanov, P, Khomiak, E, Kyrsov, I, Brovko, K, Kalnyi, S & Karpenko, O 2022, 'Development of 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*, no. 4 (8 (118)), pp. 60-70. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>

Стаття надійшла до редакції 05 листопада 2022 року