

структури оболонки для еталонного герметичного та розгерметизованого ТВЕЛ;

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

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

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

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

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

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

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



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

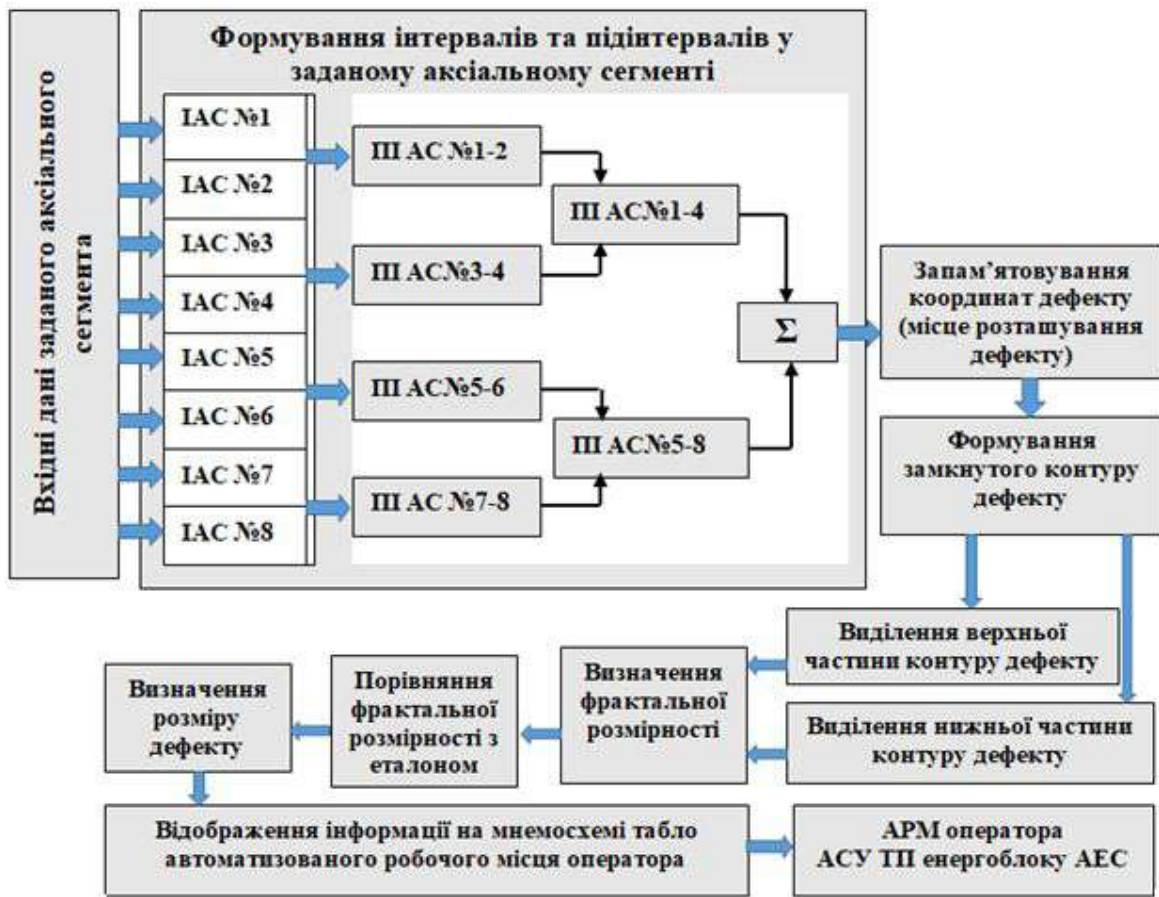


Рис. 4.3. Блок схема обчислювального модуля для виконання алгоритму визначення показника фрактальної розмірності контуру дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

При цьому в процесі обчислень, інформація перевіряється на достовірність і

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

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

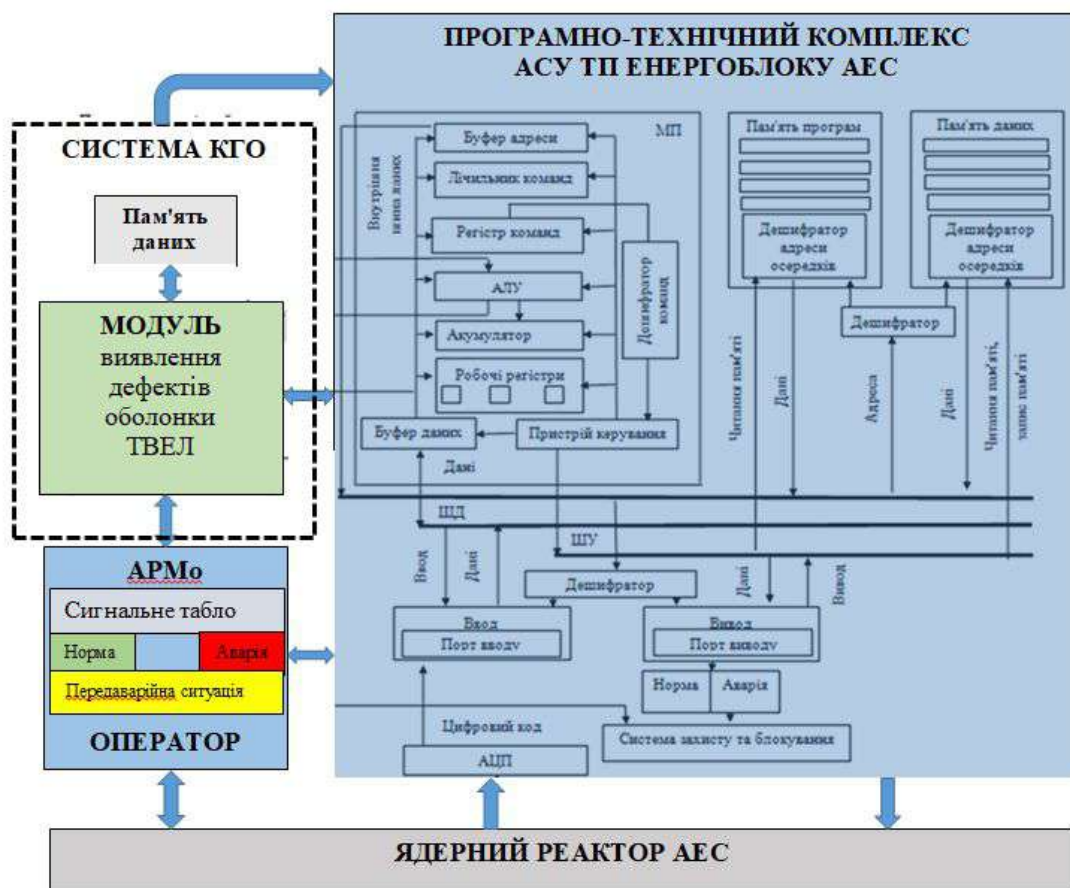


Рис. 4.5. Практичне використання модуля виявлення дефектів ТВЕЛ СКГО у програмно – технічному комплексі АСУ ТП енергоблоку АЕС

Зменшення витрат часу на оцінювання якості поверхні і макроструктури

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

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

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

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

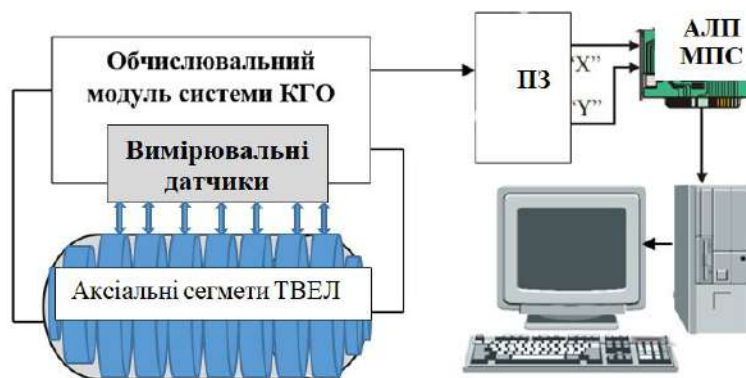


Рис. 4.6. Структурна схема проведення вимірювань діаметра оболонки ТВЕЛ по всій висоті

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

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

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

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

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

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

X – поточні показання вимірювального каналу датчика ОМВД системи КГО.

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

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

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

Розглянемо методику виміру ефективного діаметра оболонки ТВЕЛ.

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

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

де n – кількість вимірів на АС за довжиною ТВЕЛ;

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

Розглянемо методику виміру овальності оболонки ТВЕЛ.

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

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

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

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

4.5 Визначення похибки результатів вимірювань геометричних параметрів

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

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

де x_0 – похибка визначення величини коефіцієнта x_0 ;

x – похибка виміру величини x , мкм;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Висновки до четвертого розділу

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ВИСНОВКИ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

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

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

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

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

Показано, що експериментально розроблений метод оцінювання якості, може бути застосований у штатних системах КГО ядерного реактора АЕС, при проведенні реакторного та післяреакторного КГО ТВЕЛ, для виявлення місцезнаходження, типу та розміру ушкоджуючого дефекту в структурі оболонки ТВЕЛ, без вилучення ТВЕЛ з ТВЗ, що дозволяє проводити контроль герметичності ТВЕЛ, на ранній стадії у порівнянні зі штатною методикою, що застосовується в системах КГО, а також скоротити час на вантажно-розвантажувальні роботи для ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ, приблизно в 3÷5 разів, що дає економічний ефект і скорочує кількість неоперативного персоналу АЕС, який залучається.

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

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

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

оболонки ТВЕЛ.

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

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

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

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

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

22. López M., Buck M. Criticality characteristics and sensitivity analysis of Fukushima debris beds containing MCCI products. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. 2020. no. 6(4). P. 23–38.

23. Sevón T. Molten core - concrete interactions in nuclear accidents. *Theory and design of an experimental facility*. 2005. P. 5–11.

24. Izawa K., Uchida Yu., Ohkubo K., Totsuka M., Sono H., Tonoike K. Infinite multiplication factor of low-enriched UO. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2018. P. 1043–1047.

25. Шепітчак А. В., Кухочький О. В., Лігоцький О. І., Кульман О. М. Підходи до розробки референтних рівнів західноєвропейської асоціації органів регулювання ядерної безпеки (WENRA) для дослідницьких реакторів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. no. 2(90). С. 4–11.

26. Scott P., Vaillant F. History of corrosion and mechanical degradation in operating plants – plant affected areas and actions. Second International conference on Flow Accelerated. *Corrosion (FAC 2010). Proceedings. Lyon, France*. 2010. P. 315–320.

27. Hwang M., Jin E., Lee H., Jeon C. Wall thinning trend analyses for secondary side piping of Korean NPPs. 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. *Transactions. Prague, Czech Rep.* 2003. no. 5. P. 29–30.

28. Kain V., Roychowdhury S., Mathew T., Bhandakkar A. Flow accelerated corrosion and its control measures for the secondary circuit pipelines in Indian nuclear power plants. *Journal of Nuclear Materials*. 2008. Vol. 383(1–2). P. 86–91.

29. Michael J. V. Nuclear control rod position indication system. U.S. Patent, no.: US 10, 020, 081 B2. December. 2018.

30. Богорад В., Літвінська Т., Носовський А., Слєпченко Ю. Питання контролю герметичності оболонок тепловіділяючих елементів при застосуванні нових видів ядерного палива на АЕС України з реакторами ВВЕР-1000. *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки*. 2014. С. 29–30.

31. Sary M., Novotny F., Horak M., Stara M. Sampling robot for primary circuit pipelines of decommissioned nuclear facilities. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 119, P.103–303.

32. Tsitsimpelis I., Taylor J., Lennox B., Joyce J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Progress in Nuclear Energy*. 2019. Vol. 111, P. 109–124.

33. Kim S., Choi Y., Jeong K. A new approach to quantify safety benefits of disaster robots. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 49 (7), P. 1414–1422.

34. Mankevich S. K., Orlov E. P. Method of contactless control of installation of TVS in VVER. *Atomic energy*. 2017. Vol. 122, no. 1. P. 33–37.

35. Stanica D. M., Sisman G. R. Trends in computation a intelligence applied in nuclear engineer in gandnon-destructive examination techniques of nuclear units. in 7th International Conference on Electronics, *Computers and Artificial Intelligence*. 2015. P. 21–24.

36. Trojanowicz M. A. Review of flow analysis methods for determination of radionuclides in nuclear wastes and nuclear reactor coolants. *Talanta*. 2018. Vol. 183, P. 70–82.

37. Song B., Park J., Yun D. Depth-adaptive controller for spent nuclear fuel inspections. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. no. 52(8), P. 1669–1676.

38. Shin H., Jung H., Choi R., Kim C. Development of a shared remote-control robot for aerial work in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. no. 50(4), P. 613–618.

39. Ghosh A., Soto A., Veres S., Rossiter A. Human robot interaction for future remote manipulations in industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. Vol., 53(2), P. 10223–10228.

40. Lotsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a WWER-1000 reactor core. Proceedings of the 19th AER Symposium on WWER Reactor. *Physics and Reactor Safety, St. Constantine and Elena resort, Bulgaria*. 2009. P. 53–108.

41. Ovdiienko I., Ieremenko M., Khalimonchuk V., Kuchin A. Evolution of SSTC WWER cross section library for DYN3D code. Proceedings of the twenty-second Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. *Průhonice, Czech Republic*. 2012. P. 83–91.

42. Овдієнко Ю. М., Кучин О. В., Єременко М. Л., Власенко П. А. Адаптація розрахункових моделей HELIOS паливних касет ВВЕР-440 для використання програмою TRACE/PARCS. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. no. 1(81), С. 46–51.
43. Rohee E., Coulon R., Jammes C., Filiatre P., Normand S., Carrel F., Lainé F., Hamrita H. Delayed Neutron Detection with graphite moderator for clad failure detection in Sodium-Cooled Fast Reactors. *Annals of Nuclear Energy*. 2016. P. 440–446.
44. Sihver L., Bjurman B. FINES – Fuel Integrity Evaluation And Surveillance System. *Topfuel*. Stockholm. 2001. P. 46–48.
45. Максимов М. В., Пелих С. Н. Вплив невизначеності початкових даних на оцінку довгостроковості оболонки ТВЕЛ при змінному режимі експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2009. № 2. С. 13–19.
46. Suzuki M, Saito H, Udagawa Y. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-7 model and structure. *Japan Atomic Energy Agency*. 2013. JAEA-Data/Code 2013–014.
47. Suzuki M, Saito H. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-6 (Ver.1) detailed structure and user’s manual. *Japan Atomic Energy Agency*. 2005. JAEA-Data/Code 2005–003.
48. Suzuki M. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V. *Japan Atomic Energy Research Institute*. 2000. JAERI-Data/Code 2000-030.
49. Udagawa Y, Yamauchi A, Kitano K. Development of fuel performance code FEMAXI-8—model improvements for light water reactor fuel analysis and systematic validation. *Japan Atomic Energy Agency*. 2018. P. 41–44.
50. Бойко О. В., Пелих С. В. Розробка дослідження автоматизованої системи управління властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 для програми регулювання потужності реактора з постійним тиском пари другого контуру. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: технічні науки. 2018. Том 29 (68), Ч. 1. № 6. С. 91–96.
51. Tang J., Huang M., Zhao Y., Ouyang X., Huang J. A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods. *Annals of Nuclear Energy*. 2017. Vol. 110, P. 492–500.
52. Pelykh S. N., Maksimov M. V., Baskakov V. E. Grounds of VVER-1000 fuel shell life control. *Annals of Nuclear Energy*. 2013. no. 58. P. 188–197.

53. Yong S., Linzi Z. Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 163, P. 438–452.

54. Philip B. A. parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*. 2015. P. 143–171.

55. Zheng Y. Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method. *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 88, P. 437–460.

56. Hyung M. S., Kune Y. S. Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery. *Progress in Nuclear Energy*. 2011. Vol. 53, no. 7. P. 825–830.

57. Abdul R. K., Afzal R. A., Mohammed A. D., Ramis M. K. Effect of shell on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation. *Progress in Nuclear Energy*. 2019. Vol. 111, P. 1–14.

58. Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors. *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition)*. 2021. P. 95–115.

59. Shuang X., Xuhua Z., Gaojie H., Xiaxin C. CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. Vol. 53, no. 9. P. 2847–2858.

60. Мастиновский Ю. В. Фрактальный підхід до вирішення задачі з накопичення ушкодженихностей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2005. № 2. С. 80–83.

61. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывна математика. *Фрактальна геометрія - Освіта України*. 2016. Ч. 2. С. 618.

62. Lotsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a WWER-1000 reactor core. Proceedings of the 19 AER symposium on WWER reactor physics and reactor safety. *St. Constantine and Elena resort, Bulgaria*. 2019. P. 53–108.

63. Калінушкін А. Є., Курченков А. Ю., Мітін В. І., Семченков Ю. М. Сучасна система внутрішньреакторного контролю, перевірка ядерного палива ВВЕР-1000.

Ядерна та радіаційна безпека. 2010. no. 4(48). С. 18–21.

64. Saeed A., Rashid A. Development of core monitoring system for a nuclear power plant using artificial neural network technique. *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 144, P. 513.

65. Fujitsuka N., Tanouchi H., Imamura Y., Mizobuchi D., Kanagawa T., Masuda M. Experience and evaluation of advanced on-line core monitoring system BEACON at IKATA site, Proceedings of a Specialists Meeting on In-Core Instrumentation and Core Assessment. *Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA)*. 1997. P. 103–113.

66. Kovbasenko Y. Comparative Analysis of VVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability. *Universal Journal of Physics and Application*. 2016. Vol. 10, no. 4. P. 105–109.

67. Халимончук В. А. Функціонування програмного забезпечення СВРК ВВЕР-1000 верхнього рівня в умовах реалізації в Україні розширеної програми по диверсифікації ядерного палива. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. no. 1(65). С. 7–12.

68. Schulz G. Solutions of a 3D VVER-1000 Benchmark. Proc. 6-th Symposium of AER on VVER Reactor. *Physics and Safety, Kirkkonummi, Finland*. 1996. P. 54–58.

69. Павлович В. М. Фізика ядерних реакторів. *Інститут проблем безпеки АЕС*. 2009. С. 224.

70. Scandpower S. Advanced three-dimensional two-group reactor analysis code: *User's Manual; Technical Report No. SSP-09/447-U; Studsvik Scandpower: Nyköping, Sweden*. 2009. P. 1–12.

71. Downar T., Xu Y., Seker V. PARCS, v3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator: User Manual. *Technical report No. UM-NERS-09-0001; University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA*. 2013. P. 1–8.

72. Cho J., Song J., Lee K. Three-dimensional nuclear analysis system. *In Proceedings of the ANS Annual Meeting, Atlanta, GA, USA*. 2013. P. 1–11.

73. Щелокова М. А. Фрактальна геометрія до опису механізму руйнування. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровський національний університет*. 2004. Вип. 8, С. 137–144.

74. Philip B., Berrill M. A., Allu S., Hamilton S. P., Sampath R. S., Clarno K. T., Dilts G. A. A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*. 2015. Vol. 286, P. 143–171.

75. Singh T., Mazumdar T., Pandey P., Varde P. Overview of reactor core level calculation by nodal and finite difference methods. *International Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering*. Vol. 4, no. 4, P. 11–21.

76. Lee D., Choi H., Lee K., Kim H. NEM and FDM hybrid method for 3-dimensional reactor core analysis. *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting. Seoul, Korea*. 1999. P. 251.

77. Stacey W. Nuclear reactor physics, second edition, completely revised and enlarged edition. *Wiley-VCH Verlag*. 2007. P. 735.

78. Bibilashvili Yu. Experimental study of ver fuel rods behaviour under conditions, simulating RIA accident. *Enlarged Halden Programme Group Meeting*. Norway. 2002. P 54–60.

79. Nechaeva O. Researches Of Vver Fuel Rods Behaviour Under Ria Accident Conditions. *Fifth International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2003. P. 103.

80. Lee D., Kim Y., Kim Y. Consistent coupling of nodal expansion method, analytic nodal method, and finite difference method for 3-dimensional reactor core analysis. *Proceedings of PHYSOR 2010: Advances in Reactor Physics to Power the Nuclear Renaissance. Pittsburg, Pennsylvania, USA*. 2010. P. 312.

81. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском : НП 306.2.145–2008. *Державний комітет ядерного регулювання України*. 2008. С. 27.

82. Parshin N., Fedik I., Semishkin V. Modelling of behavior of 37 fuel rod assembly with Zr1%Nb-alloy simulators shell under loss-of-coolant accident conditions on PARAMETR-M facility. *Fifth International Conference on WWER Fuel Performance. Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2003. P. 97–103.

83. Pint B., Terrani K., Brady M., Cheng T., Keiser J. High temperature oxidation of

fuel shell candidate materials in steam–hydrogen environments. *J. Nucl. Mater.* 2013. no. 440. P. 420–427.

84. Terrani K., Zinkle S., Snead L. Advanced oxidation-resistant iron-based alloys for LWR fuel shell. *J. Nucl. Mater.* 2014. no. 448. P. 420–435.

85. Cheng T., Keiser J., Brady M., Terrani K., Pint B. Oxidation of fuel shell candidate materials in steam environments at high temperature and pressure. *J. Nucl. Mater.* 2012. no. 427. P. 396–400.

86. Lawrence D. Progress in nodal methods for the solution of the neutron diffusion and transport equations. *Progress in Nuclear Energy.* 1986. Vol. 17, no. 3, P. 271–301.

87. Kolev P., Lenain R. Solutions of the AER 3D Benchmark for VVER-1000, *CEA Internal Report, Saclay*, 1997. P. 127.

88. Prinsloo R., Tomašević I., Moraal H. A practical implementation of the higher-order transverse-integrated nodal diffusion method. *Annals of Nuclear Energy.* 2014. Vol. 68, P. 70–88.

89. Ольховик Ю. О. Перспективні схеми кондиціювання рідких радіоактивних відходів АЕС України. *Ядерна енергетика та довідки.* 2020. no. 3(18). С. 48–56.

90. Мальцева Т. В. Аналіз можливостей застосування ефективних матеріалів для переробки відходів на АЕС України. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті.* 2015. no. 2(17). С. 50–61.

91. System CGO TVELs YAG-12. Technical description and instruction manual. : *SNIP, ZHSH1.289.095T01.* 1988. P. 57.

92. Salyaev A., Kereksha A. CGO systems in BN reactors. *Innovations in atomic energy.* Abstracts of reports of the conference of young professionals. 2014. С. 212–216.

93. Розко А. М., Федоренко Ю. Г. Особливості цементування борвміщуючого імітату рідких радіоактивних відходів шлаколужним з'вязуючим з цеолітом. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 19): збірник матеріалів IV Міжнародної конференції.* Чернігів: ЧНТУ. 2019. С. 216.

94. NP 306.2.145–2008. Rules for Nuclear Safety of Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors: *approved by SNRIU Order No. 73 of 15.04.2008.* Kyiv:

SNRIU. 2008. P. 52.

95. NP 306.2.141–2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants: approved by SNRIU Order No. 162 of 19.11.2007. *Ofitsiyni visnyk Ukrainy*. 2008. no. 9. P. 226.

96. Rozko A., Fedorenko Yu., Zadvernyuk H. Zeolite as component binding materials for liquide radioactive waste conditioning. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2019. no. 1(20). С. 29–31.

97. Ольховик Ю. О., Федоренко Ю. Г., Розко А. М., Саєнко С. Ю., Шкуропатенко В. А. Цементування боратвмісних рідких радіоактивних відходів за підвищеної температури. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2019. no. 1(13). С. 59–66.

98. Lombard S. Safety Analysis of Mixed Cores in Pressurized Water Reactors in France. *IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors*. Vienna. 2011. P. 13–16.

99. Богорад В. І., Литвинська Т. В., Носовський А. В., Слепченко О. Ю. Питання контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів із впровадженням нових видів ядерного палива на атомних станціях України з реакторами ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. № 1(61). С. 29–33.

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

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

102. Жигалов Я. А., Пшеничний В. А. Визначення коефіцієнта ослаблення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання матеріалом оболонки циліндричних контейнерів для тимчасового зберігання рідких радіоактивних відходів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2014. no. 1(61). С. 34–44.

103. Hohorst J. MATPRO-A, a library of materials properties for light-waterreactor accident analysis. *Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab*. 1990. Vol. 4, P. 1098.

104. Dietmar Mertens H. Fuel Assembly Design and Licensing Aspects of Mixed Cores in PWRs. *IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors*. Vienna. 2011.

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

106. Likhanskii V., Afanasieva E., Efremov N., Zborovskii V. Development of defect size determination procedure in cask of WWER defective assembly detection system. *6th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2005. P. 101–105.

107. Likhanskii V. Development and using computer codes for improvement of defect assembly detection on WWER NPPs. *8th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. 2009. P. 88–94.

108. Likhanskiy V. V. Experimental off-reactor studies on modelling mass transfer processes for the development of methods of control of tightness of the casings of VVER reactors. *Questions of atomic science and technology*. 2006. Series: *Safety of the NPP*. Vol. 15, P. 145–157.

109. Kaplar E., Konobeyev A., Smimov V., Goryachev A., Prokhorov V., Eremin S. Mechanical properties of unirradiated and irradiated Zr-1%oNb shell under accident conditions. *Proceedings of the 27 Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, Maryland*. NUREG/CP-0169. USA. 2000. P. 71–75.

110. Lukyanov D. A., Albutova O. I. Automated workplace of the fuel shell tightness control system (AWS KTO) to support the operating personnel of fast neutron reactors. *Proceedings of the 18th International Conference of Young Professionals in Nuclear Power Plants*. 30-31 March 2016. P. 62–67.

111. Akio S., Shigeru S., Toshihiro F. Next-Generation ABWR and Future Nuclear Power Plants. *Toshiba review*. 2005. Vol. 60, no. 2. P. 14–21.

112. Krivenko P., Cao H., Petropavlovskii O., Weng L., Kovalchuk O. Efficiency of alkali activated hybrid cements for immobilization of low-level radioactive anion-exchange