

*П. Ф. БУДАНОВ, К. Ю. БРОВКО, Е. А. ХОМ'ЯК, О. А. ТИМОШЕНКО*

### **УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Проведено аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента, який показав, що їх застосування для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів, таких як локальні неоднорідності, мікро- та макropори, різноманітні тріщини, осьова рихлість тощо, відрізняється малою ефективністю і представляє трудомісткий процес, який потребує додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента. Крім того, досліджені методи контролю поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента дозволяють візуально виявити тільки грубі зовнішні тріщини та великі шлакові включення, дрібні тріщини та неметалеві включення, невидимі під шаром окалини. Для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки при її пошкодженні та руйнуванні запропоновано застосування розрахункового апарату, заснованого на методі теорії фракталів. Запропоновано використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь заповнення об'єму структури матеріалу оболонки при розгерметизації тепловиділяючого елемента. Розроблена математична модель пошкодження структури матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента в залежності від одночасного впливу високої температури і внутрішнього тиску, викликаного накопиченням продуктів поділу ядерного палива між таблеткою ядерного палива і внутрішньої поверхні оболонки тепловиділяючого елемента, з урахуванням фрактальних збільшень геометричних параметрів. Показано, що пошкоджені структури матеріалу оболонки тепловиділяючих елементів залежать від тиску і температури всередині оболонки, а також фрактального збільшення геометричних параметрів, таких як: об'єм і площа поверхні, зовнішній і внутрішній діаметр, висота і площа перетину, довжина оболонки і висота ядерних таблеток, зазор між внутрішньою поверхнею оболонки і ядерним паливом. Визначено критерій оцінки стану цілісності оболонки тепловиділяючого елемента, який залежить від зміни геометричних величин при пошкодженні і руйнуванні структури матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо застосування запропонованого методу контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента для обробки інформації, отриманої з обчислювального модуля системи контролю герметичності оболонки для програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління технічним процесом енергоблоку атомної електростанції, яка дозволяє виявляти розгерметизацію тепловиділяючих елементів на більш ранній стадії, в порівнянні зі штатною методикою.

**Ключові слова:** тепловиділяючий елемент, система контролю герметичності оболонки, пошкодження структури матеріалу.

*П. Ф. БУДАНОВ, К. Ю. БРОВКО, Э. А. ХОМЯК, О. А. ТИМОШЕНКО*

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОБОЛОЧКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

Проведен анализ существующих методов контроля поверхности материала оболочки тепловыделяющего элемента, который показал, что их применение для выявления поверхностных и внутренних дефектов, таких как локальные неоднородности, микро- и макropоры, различные трещины, осевая рыхлость и прочее, отличается малой эффективностью и представляет трудоемкий процесс, требующий дополнительной обработки поверхности материала оболочки тепловыделяющего элемента. Кроме того, исследованные методы контроля поверхности материала оболочки тепловыделяющего элемента позволяют визуально выявить только грубые внешние трещины и большие шлаковые включения, мелкие трещины и неметаллические включения невидимые под слоем окалины. Для оценки качества поверхности материала оболочки при ее повреждении и разрушении предложено применение расчетного аппарата, основанного на методе теории фракталов. Предложено использовать фрактальные свойства структуры материала оболочки и количественную фрактальную величину – фрактальную размерность, которая позволяет определить степень заполнения объема структуры материала оболочки при разгерметизации тепловыделяющего элемента. Разработана математическая модель повреждения структуры материала оболочки тепловыделяющего элемента в зависимости от одновременного воздействия высокой температуры и внутреннего давления, вызванного накоплением продуктов деления ядерного топлива между таблеткой ядерного топлива и внутренней поверхностью оболочки тепловыделяющего элемента, с учетом фрактальных увеличений геометрических параметров. Показано, что поврежденные структуры материала оболочки тепловыделяющих элементов зависят от давления и температуры внутри оболочки, а также фрактального увеличения геометрических параметров, таких как: объем и площадь поверхности, внешний и внутренний диаметр, высота и площадь сечения, длина оболочки и высота ядерных таблеток, зазор между внутренней поверхностью оболочки и ядерным топливом. Определен критерий оценки состояния целостности оболочки тепловыделяющего элемента, который зависит от изменения геометрических величин при повреждении и разрушении структуры материала. Даны практические рекомендации по применению предложенного метода контроля герметичности оболочки тепловыделяющего элемента для обработки информации, полученной из вычислительного модуля системы контроля герметичности оболочки для программно-технического комплекса автоматизированной системы управления техническим процессом энергоблока атомной электрической станции, которая позволяет выявлять разгерметизацию тепловыделяющих элементов на более ранней стадии, по сравнению со штатной методикой.

**Ключевые слова:** тепловыделяющие элементы, система контроля герметичности оболочки, повреждения структуры материала.

*P. F. BUDANOV, K. YU. BROVKO, E. A. KHOMIAK, O. A. TYMOSHENKO*

### **IMPROVEMENT OF FUEL ELEMENT SHELL CONTROL METHODS TO INCREASE NUCLEAR REACTOR SAFETY**

The analysis of the existing methods of control of the surface of the fuel element cladding material was carried out, which showed that their use for detecting surface and internal defects, such as local inhomogeneities, micro- and macropores, various cracks, axial looseness, etc. is characterized by low efficiency, is a laborious process that requires additional surface treatment, material of the fuel elements cladding. In addition, the investigated methods of controlling the surface of the fuel element cladding material make it possible to visually identify only rough external cracks and large slag inclusions, small cracks and non-metallic inclusions invisible under the slag layer. It is proposed to assess the quality of the surface of the shell material

© П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, Е. А. Хом'як, О. А. Тимошенко, 2020

in case of its damage and destruction, the use of a computational apparatus based on the method of the theory of fractals. It is proposed to use the fractal properties of the shell material structure and a quantitative fractal value – the fractal dimension, which makes it possible to determine the degree of filling of the volume of the shell material structure during fuel element depressurization. A mathematical model of damage to the structure of the fuel element cladding material is developed depending on the simultaneous effect of high temperature and internal pressure caused by the accumulation of nuclear fuel fission products between the nuclear fuel pellet and the inner surface of the fuel element cladding, taking into account the fractal increases in the geometric parameters of the fuel element cladding. It is shown that damaged structures of the fuel rod cladding material depend on the pressure and temperature inside the fuel rod cladding, as well as the fractal increase in geometric parameters, such as: volume and surface area, outer and inner diameters, height and cross-sectional area, cladding length and height of nuclear pellets, gap between the inner surface of the cladding and nuclear fuel. A criterion for assessing the integrity of the fuel rod cladding is determined, which depends on the change in geometric values in the event of damage and destruction of the structure of the fuel rod cladding material. Practical recommendations are given on the use of the proposed method for monitoring the tightness of the fuel element cladding for processing information obtained from the computational module of the system for monitoring the tightness of the cladding for the automated process control system of the nuclear power plant power unit, which makes it possible to detect the depressurization of fuel elements at an earlier stage in comparison with the standard procedure.

**Keywords:** fuel elements, control system for the tightness of the shell, damage to the structure of the material.

**Вступ.** У даний час актуальним є одночасне підвищення безпеки, надійності і економічності експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР атомної електростанції (АЕС). Основним параметром, що обмежує зростання ефективності експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР, є порушення герметичності оболонок тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ), який є основним елементом активної зони ядерного реактора.

У нормативних документах [1–3] не регламентується зміна пошкодження оболонок ТВЕЛ при нормальних умовах і не описано, як можна управляти цим параметром, а також не описується метод розрахунку пошкодженості матеріалу оболонок при експлуатації ТВЕЛ, яка призводить до його розгерметизації [4]. При досягнутому рівні розуміння процесу розгерметизації оболонок ТВЕЛ в нормальних умовах експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР, механізм розгерметизації оболонок приблизно в 20 % випадків невідомий [4–6].

З цієї причини на діючих ядерних реакторах типу ВВЕР немає технічних засобів і не передбачені процедури й алгоритми для визначення місця зруйнованого ТВЕЛ в активній зоні ядерного реактора, локалізації дефекту оболонки ТВЕЛ, в якому сталася розгерметизація. На АЕС України не ведеться запис статистики по локалізації областей розгерметизації в оболонках ТВЕЛ [4–7].

Отже, для підвищення безпеки, надійності і економічності експлуатації ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР актуальною проблемою є необхідність контролювати процес накопичення пошкодженості оболонок ТВЕЛ і визначити критерій розгерметизації ТВЕЛ в автоматизованому режимі, тобто оперативно, в режимі реального часу [5–7].

Тому застосування автоматизованих методів контролю цілісності або пошкодження оболонки ТВЕЛ для оцінювання критерію герметичності або розгерметизації оболонки ТВЕЛ є актуальним завданням і головним фактором безпечної та надійної експлуатації ТВЕЛ, що і зумовило вибір напрямку дослідження [8].

**Метою роботи** є підвищення безпеки ядерного реактора, шляхом оперативного виявлення негерметичних тепловиділяючих елементів на основі застосування вдосконаленого методу контролю з використанням апарату фрактально-кластерної теорії.

**Аналіз досліджень з виявлення чинників розгерметизації оболонок ТВЕЛ ядерних реакторів**

**типу ВВЕР.** Найважливішою вимогою до тепловиділяючих елементів є збереження герметичності їх оболонок при експлуатації, зберіганні і транспортуванні, оскільки воно безпосередньо пов'язане з безпекою цих етапів поводження з ними. Проте, при експлуатації ядерного реактору типу ВВЕР спостерігаються випадки розгерметизації оболонок ТВЕЛ. Ідентифікація та вивантаження тепловиділяючих збірок (ТВЗ) з негерметичними ТВЕЛ з ядерного реактора типу ВВЕР можливе тільки після його зупинки. Позапланова зупинка ядерного реактора типу ВВЕР через перевищення експлуатаційної межі по активності теплоносія, а також дострокове вивантаження ТВЗ завдають економічних збитків АЕС. Для прогнозування радіоактивного забруднення теплоносія і поведінки ТВЕЛ після розгерметизації потрібна розробка моделей і методів контролю, а також встановлення критеріїв допустимої кількості негерметичних ТВЕЛ в активній зоні ядерного реактору типу ВВЕР і критеріїв можливості продовження експлуатації або дострокового вивантаження ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ. Для скорочення випадків розгерметизації, необхідне встановлення їх причин (недолік конструкції або технології виготовлення, умов експлуатації) і прийняття відповідних заходів. У цьому плані найбільш повна і достовірна інформація може бути отримана в результаті післяреакторних досліджень.

При експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР оболонки ТВЕЛ піддаються корозійному впливу теплоносія, продуктів поділу, палива і домішок в ньому, механічному впливу теплоносія, деталей ТВЗ, паливного сердечника і внутрішньТВЕЛьних газів та радіаційним пошкодженням, які призводять до змін властивостей матеріалу, що може привести до розгерметизації ТВЕЛ. Встановлення причин розгерметизації дозволяє вжити превентивних заходів, проте випадки розгерметизації виключити повністю не вдається.

На підставі багаторічних досліджень у світовій практиці були встановлені наступні причини і механізми розгерметизації ТВЕЛ [9, 10]:

- 1) технологічні дефекти оболонок, кінцевих деталей і зварних швів, паливних таблеток, ТВЗ і їх компонентів;
- 2) волога в паливі або інші домішки в ТВЕЛ;
- 3) перевищення проектного вигорання і (або) потужності, нерегламентовані перехідні режими;
- 4) гідродинамічна недосконалість конструкції;

5) порушення водно-хімічного режиму, забруднення теплоносія;

6) засмічення теплоносія сторонніми твердими частинками;

7) відкладення продуктів корозії;

8) пошкодження в процесі технічного обслуговування.

З точки зору взаємодії між конструктором, виробником, постачальником і споживачем палива причини розгерметизації ТВЕЛ об'єднують в такі групи:

- конструктивні;
- технологічні;
- експлуатаційні.

Механізми розгерметизації ТВЕЛ можуть бути наступні:

- схлопування оболонки;
- первинне гідрування оболонки;
- корозія (в тому числі рівномірна, локальна, під відкладеннями);

- фретинг-корозія оболонок;
- пошкодження оболонок;
- взаємодія палива з оболонкою.

Крім того, іноді утворювалися наскрізні дефекти в оболонці, кінцевих деталях і зварних швах на стадії виготовлення, які не виявлялися при контролі.

В результаті аналізу встановлено, що основними причинами розгерметизації оболонки ТВЕЛ в ядерному реакторі типу ВВЕР [10–12] є:

1. У 60 % випадків розгерметизації ТВЕЛ ядерного реактору типу ВВЕР-1000 наскрізне пошкодження оболонок відбулося за рахунок взаємодії зі сторонніми предметами, що потрапляють в пучок ТВЕЛ з теплоносія (експлуатаційна причина), два випадки розгерметизації сталися за рахунок фретинг-корозії при взаємодії ТВЕЛ один з одним, однак корінна причина розкріплення нижнього кінця одного з них не встановлена, два ТВЕЛ (20 %) розгерметизувалися з технологічних причин – внутрішнє гідрування оболонок [10–12].

2. Дефекти оболонок по перетину ТВЗ ВВЕР-1000 розподілені випадковим чином, а по висоті реєструються, переважно, в районі опорної решітки пучка або під нижніми дистанцієюми ґратами. У ТВЕЛ з внутрішнім гідруванням дефекти розподілені, практично, по всій висоті паливного сердечника, при цьому не представляється можливим відокремити первинні від вторинних [8–10].

Розгерметизація ТВЕЛ за механізмом фретинг-корозії сталася поблизу нижньої решітки. У ТВЕЛ ядерного реактору типу ВВЕР ділянки вторинного гідрування оболонок віддалені від первинних дефектів, як правило, на відстань 2500...3000 мм і часто впритул примикають до верхніх зварних з'єднань. Не встановлено явні залежності відстані між первинними і вторинними дефектами оболонок ні від лінійної потужності, при якій експлуатувалися негерметичні ТВЕЛ, ні від часу їх експлуатації в негерметичному стані.

3. При експлуатації негерметичних ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР в оболонках можуть утворитися вторинні дефекти внаслідок локального гідрування. Час між утворенням первинного і вторинного дефекту, як правило, менший, ніж тривалість паливної кампанії. Поза зоною підвищеного гідрування оболонка негерметичного ТВЕЛ зберігає пластичність і досить високу міцність, тоді як на ділянках підвищеного гідрування вона руйнується крихко при невеликих навантаженнях. Тангенціальна деформація оболонки сердечником, що розпухає, щонайменше, на 0,5 % не призвела до її руйнування. Подовження негерметичних ТВЕЛ, як правило, менше герметичних, а їх діаметр перевищує діаметр ТВЕЛ на величину до 0,3 мм.

4. Вихід цезію з паливного сердечника ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000 знаходиться в межах 16...44 %. Вихід цезію з паливних таблеток залежить не тільки від потужності на даній ділянці негерметичного ТВЕЛ, але і від ступеня окислення оболонки і палива та погіршує теплопровідність і коефіцієнт теплопередачі в зоні їх контакту. Це супроводжується збільшенням температури, від якої суттєво залежить величина ефекту. В діапазоні зміни сумарної площі наскрізних дефектів від 0,6 до 106 мм<sup>2</sup> і середнього вигорання палива від 13 до 42 МВт·доб/кг вихід цезію з палива слабо зменшується зі збільшенням розміру дефектів.

5. Значна ерозія палива ВВЕР відбувається в зонах великих дефектів оболонок внаслідок стирання таблеток твердим предметом і випадання дрібних фрагментів паливних таблеток. В інших перетинах з наскрізними дефектами зафіксована ерозія таблеток, що супроводжується «вимиванням» з ТВЕЛ, за попередніми оцінками не більше 4...5 %.

6. В ході проведення післяреакторних досліджень вдалося встановити, що причиною розгерметизації ТВЕЛ всіх досліджених ТВЗ ядерного реактору типу ВВЕР-1000 були пошкодження їх оболонок сторонніми предметами, які циркулюють в потоці теплоносія. При формуванні вторинних дефектів найбільшому гідруванню піддавався район нижньої торцевої заглибки ТВЕЛ. Гамма-сканування негерметичних оболонок ТВЕЛ виявило вимивання Cs-137 на ділянках поблизу вторинних наскрізних дефектів і міграцію цезію на торці і по радіусу паливних таблеток.

7. Порівняння макроструктури уранового палива негерметичних і герметичних ТВЕЛ ядерного типу ВВЕР-1000 показало, що розвиток сітки макротріщин для останніх відбувається в меншому ступені. Аналіз мікроструктури показав, що основною відмінністю є реструктуризація палива на ділянках вторинних дефектів в негерметичних ТВЕЛ, що виражається в збільшенні розміру зерен. Також було виявлено зменшення щільності палива в місцях, розташованих поблизу ділянок вторинного гідрування.

В результаті металографічних досліджень [6–8] встановлено, що структура матеріалу оболонки (СМО) ТВЕЛ в негерметичних і герметичних ТВЕЛ фрагментована в поперечному перерізі в основному радіальними тріщинами на кілька частин.

Більшість тріщин перетинають всю СМО ТВЕЛ. У перетинах наскрізних дефектів оболонки негерметичних ТВЕЛ фрагментовані більшою мірою, ніж на решті частини сердечника. Поблизу наскрізних дефектів оболонки негерметичних ТВЕЛ виявлена ерозія таблеток у вигляді збільшення центрального отвору і відсутності сегмента. У деяких перетинах негерметичних ТВЕЛ виявлено зменшення діаметра центрального отвору таблетки. В результаті досліджень мікроструктури СМО ТВЕЛ герметичних ТВЕЛ, які відпрацювали в штатних умовах, зміни розміру зерен і пористості уздовж радіуса не з'являлися. Найбільш значні зміни мікроструктури СМО ТВЕЛ виявлені в негерметичних ТВЕЛ.

У СМО ТВЕЛ утворилися концентричні структурні зони. Біля центрального отвору розташована зона з підвищеною пористістю. До цієї зони примикала область зі збільшеними нерівноосними і рівноосними зернами. Далі по радіусу перебувала зона з розміром зерен, близьким до вихідного, і з підвищеною пористістю. Пори в цій зоні об'єднані в ланцюжки, витягнуті уздовж радіуса СМО ТВЕЛ. У периферійній зоні СМО ТВЕЛ негерметичного ТВЕЛ розмір зерен і пористість практично такі ж, як в герметичному ТВЕЛ.

Зміна розмірів зерен і збільшення пористості свідчать про істотне (понад 1200 °С) збільшення температури в центральній зоні перетину СМО ТВЕЛ негерметичних ТВЕЛ. Підвищення температури відбувається внаслідок заповнення зазору між таблетками і оболонкою паром і через зниження теплопровідності при збільшенні відношення кисневого коефіцієнта. В результаті підвищення температури газоподібні і летючі продукти поділу виходять з зерен за їх межі. У деяких негерметичних ТВЕЛ розпухання і термічне розширення СМО ТВЕЛ викликало механічний вплив паливного сердечника на оболонку (після зникнення зазору між ними).

Основним експлуатаційним фактором, що впливає на температуру СМО ТВЕЛ, є лінійна потужність ТВЕЛ.

Кількісні оцінки інертних газів, що вийшли з негерметичного ТВЕЛ, здійснювали за результатами металографії і гамма-спектрометричного вимірювання.

**Аналіз фізико-хімічних процесів в матеріалі оболонки ТВЕЛ в процесі експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР.** Вважається встановленим, що в матеріалі оболонки ТВЕЛ ядерного реактора ВВЕР в процесі експлуатації відбуваються такі основні фізико-хімічні процеси [12]:

- радіаційне зміцнення і зниження пластичності;
- радіаційна і термічна повзучість;
- радіаційне зростання;
- термомеханічна взаємодія між паливом і оболонкою;
- прогин ТВЕЛ, який пов'язаний з термомеханічною взаємодією в пучку.

Зміна діаметру і довжини ТВЕЛ в процесі експлуатації обумовлені розмірними змінами

оболонки. З початку експлуатації під дією надлишкового тиску теплоносія діаметр ТВЕЛ зменшується. Зі збільшенням вигорання темп зменшення падає до нуля, після чого діаметр оболонки починає збільшуватися. Одночасно зі зменшенням діаметра оболонки відбувається збільшення діаметра паливних таблеток – розпухання палива, що призводить до зміни структури матеріалу оболонки ТВЕЛ. Таким чином, з огляду на аналіз фізико-хімічних процесів в матеріалі оболонки ТВЕЛ в процесі експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР і впливу всіх вище перерахованих факторів і їх наслідків, в роботі було запропоновано розглядати утворення первинних і вторинних дефектів оболонки ТВЕЛ на основі фрактально-кластерної теорії.

Розглянемо процес утворення дефектів в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ (рис. 1).



Рисунок 1 – Процес утворення первинних і вторинних дефектів при пошкодженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ

При впливі факторів руйнування на зовнішню і внутрішню поверхню матеріалу оболонки ТВЕЛ відбувається первинний дефект у вигляді утворення мікропор розміром до 5 мкм, які, відповідно до кластерної теорії, можна прийняти у вигляді окремого кластера. Подальше збільшення кількості мікропор (кластерів) призводить до утворення макропор до 500 мкм і відповідно до утворення кластерних агрегацій.

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

Таким чином, отримана в результаті вторинного дефекту кластер-кластерна структура (рис. 1) являє собою пористу неоднорідну структуру, яка як відомо, має специфічні фрактальні властивості.

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

**Моделювання процесу пошкодження структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.** В роботі запропоновано основним фізичним процесом накопичення пошкодження вважати повзучість матеріалу оболонки ТВЕЛ при впливі на неї руйнівних чинників для реальних режимів експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР.

Тому, розробка методу контролю розгерметизації (пошкодження) оболонки ТВЕЛ полягає у визначенні параметра пошкодження матеріалу оболонки, що визначається формулою (1):

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

де  $A_0$  – питоме розсіювання, яке характеризує зміну матеріалу оболонки ТВЕЛ;

$A(\tau)$  – питоме розсіювання, яке характеризує інтенсивність пошкодження за час  $\tau$ ; залежить від тиску  $P$  і температури  $T$  всередині оболонки ТВЕЛ, а також фрактального збільшення геометричних параметрів  $\Delta H$  та визначається формулою (2):

$$A(\tau) = F(P, T, \Delta H). \quad (2)$$

Необхідно відзначити, що в матеріалі оболонки ТВЕЛ під впливом тиску інертних газів в результаті ядерної реакції в ядерному паливі, підвищення температури вище  $360^\circ\text{C}$ , а також впливу радіоактивного випромінювання утворюються локальні неоднорідності, мікропори і тріщини. Тому, структура матеріалу оболонки ТВЕЛ піддається розтягуванню, розбуханню і повзучості, тобто в різних напрямках приймає анізотропний стан, а, отже, має специфічні фрактально-кластерні властивості.

Крім того, виходячи з формул (1) і (2), в роботі запропоновано критерій, за яким оцінюється герметичність або розгерметизація оболонки ТВЕЛ.

ТВЕЛ вважається герметичним якщо виконується умова (3):

$$\omega(\tau) \leq 1. \quad (3)$$

ТВЕЛ вважається негерметичним якщо виконується умова відповідно до вираз (4):

$$\omega(\tau) > 1. \quad (4)$$

Таким чином, удосконалено метод контролю герметичності оболонки ТВЕЛ шляхом розробки математичної моделі, що враховує фрактальні властивості структури матеріалу при її пошкодженості і визначені умови для критерію оцінки стану ТВЕЛ.

**Висновки.** Розроблена математична модель, яка показує, що на параметр пошкодження матеріалу

оболонки ТВЕЛ значний вплив мають фрактальні властивості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, а, отже, розгерметизація ТВЕЛ залежить від ступеня фрактальної розмірності геометричних величин: об'єму, площі, довжини, внутрішнього і зовнішнього діаметра оболонки.

Кінцевим результатом роботи є визначення дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ і передачі цієї інформації на автоматизоване місце оператора про виявлені дефекти і їх розташування на ТВЕЛ.

Дані практичні рекомендації щодо впровадження обчислювального програмного модуля системи для програмно-технічного комплексу АСУТП енергоблока АЕС. Для сполучення обчислювального модуля системи з програмним обчислювальним комплексом АСУТП енергоблоком АЕС була удосконалена інформаційно-алгоритмічна схема АСУТП енергоблока при функціонуванні модуля для виявлення дефектів ТВЕЛ в нештатних режимах роботи енергоблока АЕС.

### Список літератури

1. Круглов А. Б., Круглов В. Б., Харитонов В. С., Стручалин П. Г. Неразрушающая методика измерений теплофизических свойств твэлов с плотным топливом. *ВАНТ. Серия: ядерно-реакторные константы*. 2018. Вып. 4. С. 147–152.
2. Богомолов В. Н. Алгоритм бездемонтажной проверки измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реакторов типа БН. *Аннотатура и новости радиационных измерений*. 2018. № 1. С. 115–120.
3. Албутова О. И., Лукьянов Д. А. Исследование зависимости показаний секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-600 от эксплуатационных параметров. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2015. № 2. С. 32–38.
4. Волков А. В., Кузнецов И. А. Разгерметизация оболочки твэла быстрого реактора с выходом газообразных продуктов деления в натрий. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2006. № 2. С. 39–43.
5. Битюцкая Л. А., Кузнецов П. В., Богатиков Е. В. Методы фрактальной параметризации поверхностных деформационных субструктур. *Нелинейный мир*. Москва, 2005. Т. 3, № 3. С. 202–212.
6. Потапов А. А., Герман В. А. О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов. *Радиотехника и электроника*. Москва, 2004. Т. 49, № 12. С. 1468–1491.
7. Дворников П. А., Лукьянов Д. А., Шутов С. С., Жилкин А. С. Методы локализации дефектных ТВС в реакторе МБИР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2013. № 3. С. 24–33.
8. Сухих А. В., Павлов С. В. Использование импульсного метода вихревого контроля для дефектоскопии облучённых твэлов ВВЭР. *Атомная энергия*. 2009. Т. 107, вып. 2. С. 115–118.
9. Новоселов А. Е. Состояние оболочек ТВЭЛов ВВЭР после шести лет эксплуатации. *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 2. С. 24–32.
10. Смирнова И. М. Результаты исследований поверхностных отложений на оболочках твэлов РБМК-1000. *Теплоэнергетика*. 2010. № 7. С. 17–20.
11. Староверов А. И., Салаяев А. В., Зверев И. Д. Опыт ввода в эксплуатацию секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов РУ БН-600 и РУ БН-800. *Десятая международная научно-техническая конференция "Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики"*. Москва, 25–27 мая 2016. С. 162–164.
12. Дворников П. А., Ковтун С. Н., Шутов С. С. Локализация дефектных ТВС по показаниям датчиков секторного КГО на основе моделей переноса осколков деления в активной зоне реактора типа БН. *Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции "Теплофизика реакторов на быстрых"*

нейтронах (Теплофизика – 2014). Обнинск, 14–17 октября 2014. С. 205–206.

### References (transliterated)

1. Kruglov A. B., Kruglov V. B., Haritonov V. S., Struchalin P. G. Nerazrushayushchaya metodika izmerenij teplofizicheskikh svoystv tvelov s plotnym toplivom [Non-destructive technique for measuring the thermophysical properties of fuel elements with dense fuel]. *VANT. Seriya: yaderno-reaktornye konstanty* [VANT. Series: nuclear reactor constants]. 2018, iss. 4, pp. 147–152.
2. Bogomolov V. N. Algoritm bezdemontrazhnoj proverki izmeritel'nykh kanalov sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktorov tipa BN [Algorithm for non-dismantling testing of measuring channels of the sector system for monitoring the tightness of the fuel element cladding of BN reactors.]. *Apparatura i novosti radiacionnykh izmerenij* [Radiation measurement equipment and news]. 2018, no. 1, pp. 115–120.
3. Albutova O. I., Luk'yanov D. A. Issledovanie zavisimosti pokazanij sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktora BN-600 ot ekspluatatsionnykh parametrov [Study of the dependence of the readings of the sector control system for the tightness of the cladding of fuel elements of the BN-600 reactor on the operating parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika* [Proceedings of higher educational institutions. Nuclear energy]. 2015, no. 2, pp. 32–38.
4. Volkov A. V., Kuznecov I. A. Razgermetizatsiya obolochki tvela bystrogo reaktora s vyhodom gazoobraznykh produktov deleniya v natrij [Depressurization of the fuel element cladding of a fast reactor with the release of gaseous fission products into sodium]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [Proceedings of universities. Nuclear energy]. 2006, no. 2, pp. 39–43.
5. Bityuckaya L. A., Kuznecov P. V., Bogatikov E. V. Metody fraktal'noj parametrizatsii poverhnostnykh deformatsionnykh substruktur [Methods of fractal parametrization of surface deformation substructures]. *Nelinejnyj mir* [Non-linear world], 2005, vol. 3, no. 3, pp. 202–212.
6. Potapov A. A., German V. A. O metodah izmereniya fraktal'noj razmernosti i fraktal'nykh signatur mnogomernykh stohasticheskikh signalov [About methods of measuring fractal dimension and fractal signatures of multidimensional stochastic signals]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 2004, vol. 49, no. 12, pp. 1468–1491.
7. Dvornikov P. A., Luk'yanov D. A., Shutov C. C., Zhilkin A. S. Metody lokalizatsii defektnykh TBC v reaktore MBIR [Methods of localization of defective TBCs in the MBIR reactor]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [Proceedings of universities. Nuclear energy]. 2013, no. 3, pp. 24–33.
8. Suhii A. V., Pavlov S. V. Ispol'zovanie impul'snogo metoda vihretokovogo kontrolya dlya defektoskopii obluchoyennykh tvelov VVER [The use of the pulsed method of eddy current testing for flaw detection of irradiated fuel elements of VVER]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2009, vol. 107, iss. 2, pp. 115–118.
9. Novoselov A. E. Sostoyanie obolochek TVELOV VVER posle shesti let ekspluatatsii [Condition of VVER fuel rod cladding after six years of operation]. *Fizika i himiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials processing]. 2009, no. 2, pp. 24–32.
10. Smirnova I. M. Rezul'taty issledovaniy poverhnostnykh otlozhenij na obolochkah tvelov RBMK-1000 [Results of investigations of surface deposits on fuel element cladding RBMK-1000]. *Teploenergetika* [Heat power engineering]. 2010, no. 7, pp. 17–20.
11. Staroverov A. I., Salyaev A. V., Zverev I. D. Opyt vvoda v ekspluatatsiyu sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov RU BN-600 i RU BN-800 [Experience of putting into operation the sector control system of tightness of fuel-element cladding of RU BN-600 and RU BN-800]. *Desyataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki"* [Tenth International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy"]. Moscow, 2016, pp. 162–164.
12. Dvornikov P. A., Kovtun S. N., Shutov S. S. Lokalizatsiya defektnykh TVS po pokazaniyam datchikov sektornogo KGO na osnove modelej perenosa oskolok deleniya v aktivnoj zone reaktora tipa BN [Localization of defective fuel assemblies according to the readings of sensors of the sector CGO based on models of fission fragments transfer in the core of a BN-type reactor]. *Sbornik tezisov dokladov na nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Teplofizika reaktorov na bystrykh nejtronah* (Теплофизика – 2014) [Collection of abstracts of reports at the scientific and technical conference "Thermal physics of fast reactors (Thermophysics – 2014)]. Obninsk, 2014. pp. 205–206.

Надійшло (received) 15.12.2020

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Буданов Павло Феофанович (Буданов Павел Феофанович, Budanov Pavlo Feofanovich)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії; Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>; e-mail: [pavelfeofanovich@ukr.net](mailto:pavelfeofanovich@ukr.net).

**Бровко Костянтин Юрійович (Бровко Константин Юрьевич, Brovko Kostiantyn Yuriiovych)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9669-9316>; e-mail: [brovkokonstantin@gmail.com](mailto:brovkokonstantin@gmail.com).

**Хом'як Едуард Анатолійович (Хомьяк Эдуард Анатольевич, Khomiak Eduard Anatoliiovych)** – аспірант Української інженерно-педагогічної академії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-2986>; e-mail: [eakhomiak@gmail.com](mailto:eakhomiak@gmail.com).

**Тимошенко Олег Андрійович (Тимошенко Олег Андреевич, Tymoshenko Oleh Andriiovych)** – аспірант Української інженерно-педагогічної академії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4660-1840>; e-mail: [timafey148@gmail.com](mailto:timafey148@gmail.com).