

УДК 621.311

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/08>**Буданов П.Ф.**

Українська інженерно-педагогічна академія

Бровко К.Ю.

Українська інженерно-педагогічна академія

Жуков С.Ф.

Українська інженерно-педагогічна академія

Хом'як Е.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

РОЗРОБКА МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Проведено аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елементу, який показав, що їх застосування для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів, таких як локальні неоднорідності, мікро і макропори, різноманітні тріщини, осьова рихлість, відрізняється малою ефективністю, представляє трудомісткий процес, який потребує додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елементу. Крім того, досліджені методи контролю поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елементу дозволяють візуально виявити тільки грубі зовнішні тріщини та великі шлакові включення, дрібні тріщини та неметалеві включення невидимі під кулею окалини. Запропоновано для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки у разі її пошкодження чи руйнування 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 обсягу структури матеріалу оболонки під час розгерметизації тепловиділяючого елементу. Розроблена математична модель пошкодження структури матеріалу оболонки тепловиділяючого елементу залежно від одночасного впливу високої температури і внутрішнього тиску, викликаного накопиченням продуктів поділу ядерного палива між таблеткою ядерного палива і внутрішньою поверхнею оболонки тепловиділяючого елементу, 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: обсяг 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 елементу, який залежить від зміни геометричних величин у разі пошкодження і руйнування структури матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо застосування запропонованого методу контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елементу для обробки інформації, отриманої з обчислювального модуля системи контролю герметичності оболонки для програмно-технічного комплексу АСУ ТП енергоблоку АЕС, 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.

Постановка проблеми. Створення надійних, безпечних та економічно ефективних атомних електростанцій є першочерговим завданням у Концепції розвитку атомної енергетики України. Особлива увага приділяється вивченню процесів, які проходять в активній зоні реактора саме за порушень режимів нормальної експлуатації,

які приводять до аварійних ситуацій. Одним зі шляхів зменшення наслідків аварійних ситуацій є збереження охолоджуваності активної зони реактора, яка може бути порушена у разі можливого перегріву, формозміни і розгерметизації оболонки ТВЕЛ. В більшості країн, які розвивають атомну енергетику, приділяється увага питанню вивчення

поведінки ТВЕЛів в аварійних режимах. Тому завдання дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються в оболонці ТВЕЛ у разі її розгерметизації, є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним параметром, що обмежує зростання ефективності експлуатації ядерного реактору типу ВВЕР, є порушення герметичності оболонок тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ), який є основним елементом активної зони ядерного реактора.

У нормативних документах [1, с. 117; 3, с. 34] не регламентується зміна пошкодження оболонок ТВЕЛ за нормальних умов і не описано, як можна управляти цим параметром, а також не описується метод розрахунку пошкодженості матеріалу оболонок під час експлуатації ТВЕЛ, яка призводить до його розгерметизації [4, с. 40]. При досягненні рівні розуміння процесу розгерметизації оболонок ТВЕЛ в нормальних умовах експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР механізм розгерметизації оболонок приблизно в 20% випадків невідомий [4, с. 41; 5, с. 208]. З цієї причини на діючих ядерних реакторах типу ВВЕР немає технічних засобів і не передбачені процедури і 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 [6, с. 1470; 7, с. 53].

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, с. 204; 7, с. 51].

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 і надійної експлуатації ТВЕЛ, що і зумовило вибір напряму дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення безпеки ядерного реактора шляхом оперативного виявлення негерметичних тепловидільних елементів на основі застосування вдосконаленого методу контролю з використанням апарату фрактально-кластерної теорії.

Основні матеріали дослідження. Найважливішою вимогою до тепловиділяючих елементів є

збереження герметичності їх оболонок під час експлуатації, зберігання і транспортування, оскільки воно безпосередньо пов'язане з безпекою цих етапів поводження з ними. Проте під час експлуатації ядерного реактору типу ВВЕР спостерігаються випадки розгерметизації оболонок ТВЕЛ. Ідентифікація та вивантаження тепловиділяючих збірок (ТВЗ) з негерметичними ТВЕЛ з ядерного реактору типу ВВЕР можливі тільки після його зупинки. Позапланова зупинка ядерного реактору 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, технології виготовлення, умов експлуатації) і прийняття відповідних заходів. У цьому плані найбільш повна і достовірна інформація може бути отримана в результаті післяреакторних досліджень. В результаті аналізу встановлено, що основними причинами розгерметизації оболонок ТВЕЛ в ядерному реакторі типу ВВЕР є такі:

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 фреттинг-корозії під час взаємодії ТВЕЛ один з одним, однак корінна причина розкріплення нижнього кінця одного з них не встановлена, два ТВЕЛ (20%) розгерметизувались з технологічних причин – внутрішнє гідрування оболонки.

2. Дефекти оболонок по перетину тепловиділяючої збірки ВВЕР-1000 розподілені випадковим чином, а по висоті рееструються переважно в районі опорної решітки пучка або під нижніми дистанцієюними ґратами. У ТВЕЛ з внутрішнім гідруванням дефекти розподілені практично по всій висоті паливного сердечника, при цьому не представляється можливим відокремити первинні від вторинних. Розгерметизація ТВЕЛ за механізмом фреттинг-корозії сталася поблизу нижньої решітки. У ТВЕЛ ядерного реактору типу ВВЕР

ділянки вторинного гідрування оболонок віддалені від первинних дефектів зазвичай 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, за якої експлуатувалися негерметичні ТВЕЛ, ні від часу їх експлуатації в негерметичному стані.

3. Під час експлуатації негерметичних ТВЕЛ ядерного реактору типу ВВЕР в оболонках можуть утворитися вторинні дефекти внаслідок локального гідрування. Час між утворенням первинного і вторинного дефекту зазвичай 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 за невеликих навантажень. Тангенціальна деформація оболонки щонайменше на 0,5% не призвела до її руйнування. Подовження негерметичних ТВЕЛ зазвичай 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 цій ділянці негерметичного ТВЕЛа, 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 мм² і середнього вигорання палива від 13 до 42 МВт·сут/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 тепловиділяючих збірок ядерного реактору типу ВВЕР-1000 були пошкодження їх оболонок сторонніми предметами, які циркулюють в потоці теплоносія. Під час формування вторинних дефектів найбільшому гідруванню піддавався район нижньої

торцевої заглушки ТВЕЛів. 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 твелах, 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 ТВЕЛах фрагментована в поперечному перерізі в основному радіальними тріщинами на кілька частин.

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

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 ТВЕЛа розмір зерен і пористість практично такі ж, як в герметичному ТВЕЛі.

Зміна розмірів зерен і збільшення пористості свідчать про істотне (вище 1200 °С) збільшення температури в центральній зоні перетину СМО ТВЕЛ негерметичних ТВЕЛів. Підвищення тем-

ператури відбувається внаслідок заповнення зазору між таблетками і оболонкою паром і через зниження теплопровідності за збільшення кисневого коефіцієнта. В результаті підвищення температури газоподібні і летючі продукти поділу виходять з зерен за їх межі. У деяких негерметичних ТВЕЛах 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 ТВЕЛа. Кількісні оцінки інертних газів, що вийшли з негерметичного твела, виробляли за результатами металографії і гамма-спектрометричного вимірювання.

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

За впливу 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, за підвищення температури і тиску, між внутрішньою поверхнею оболонки і зовнішньої поверхнею ядерного палива, 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 під час утворення дефектів в оболонці ТВЕЛ для встановлення факту його розгерметизації на основі обчислювального апарату фрактально-кластерної теорії. В роботі запропоновано основним фізичним процесом накопичення пошкоженості вважати повзучість матеріалу оболонки ТВЕЛ за впливу на неї руйнівних чинників для реальних режимів експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР.

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

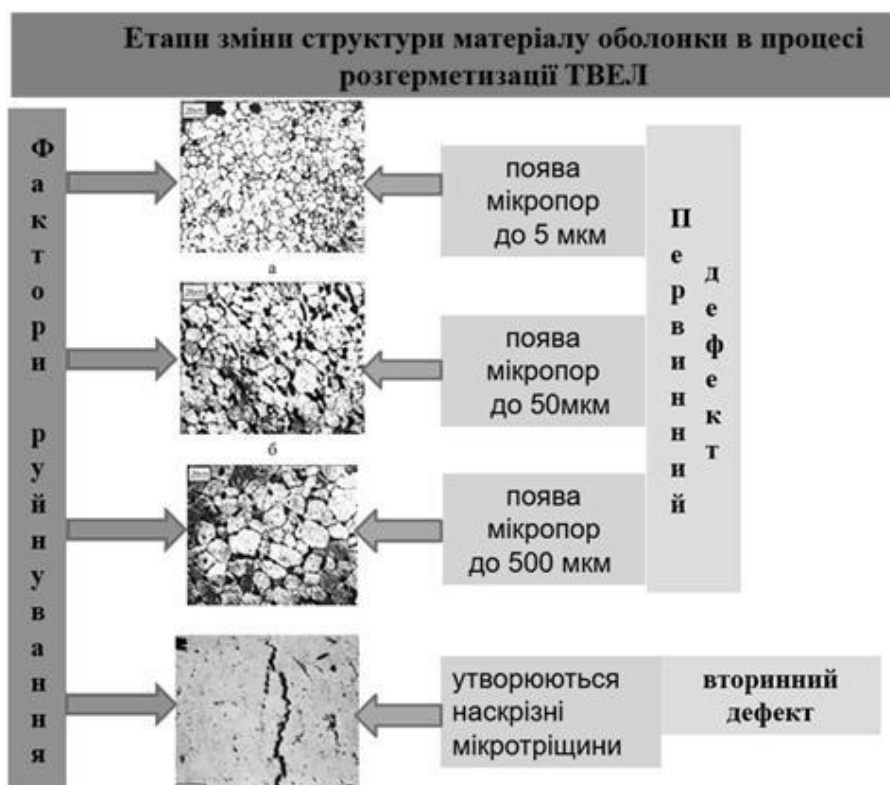


Рис. 1. Процес утворення первинних і вторинних дефектів у разі пошкоженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ

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

де A_0 – питоме розсіювання, яке характеризує зміну матеріалу оболонки ТВЕЛ; $A(\tau)$ – питоме розсіювання, яке характеризує інтенсивність пошкодження за час τ , залежить від тиску P і температури T всередині оболонки ТВЕЛ, а також фрактального збільшення геометричних параметрів ΔH 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°C , а також впливу радіоактивного випромінювання утворюються локальні неоднорідності, мікропори і тріщини, тому структура матеріалу оболонки ТВЕЛ піддається розтягуванню, розбуханню і відзначається повзучістю, 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 відповідно до виразу (3):

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

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

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

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

Висновки. Розроблена математична модель, яка показує, що на параметр пошкоженості матеріалу оболонки ТВЕЛ значний вплив мають фрактальні властивості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, а отже, розгерметизація ТВЕЛ залежить від ступеня фрактальної розмірності геометричних величин: обсягу, площі, довжини, внутрішнього і зовнішнього діаметра оболонки. Кінцевим результатом роботи обчислювального програмного модуля є визначення дефекту матеріалу оболонки ТВЕЛ і передачі цієї інформації на автоматизоване місце оператора АРМ (о) про виявлені дефекти і їх розташування на ТВЕЛ. Дані практичні рекомендації щодо впровадження обчислювального програмного модуля системи СКГО для ПТК АСУТП енергоблоку АЕС. Для сполучення обчислювального модуля системи СКГО з програмним обчислювальним комплексом АСУ ТП енергоблоком АЕС була удосконалена інформаційно-алгоритмічна схема АСУТП енергоблоку під час функціонування модуля для виявлення дефектів ТВЕЛ в нештатних режимах роботи енергоблоку 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. *Аппаратура 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. Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Хом'як Е. А. Аналіз факторів безпеки при експлуатації тепловиділяючих елементів ядерного реактора атомної електростанції. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. Випуск 204 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». Харків : ХНТУСГ, 2019. С. 50–52.

Budanov P.F., Brovko K.Yu., Zhukov S.F., Khomiak E.A. 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, 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 scale ball. It is proposed to assess the quality of the surface of the shell material 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 APCS of the NPP power unit, which makes it possible to detect the depressurization of fuel elements at an earlier stage in comparison with the standard procedure.

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