

ФРАКТАЛЬНО-КЛАСТЕРНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Кирисов І. Г.

ВСТУП

На сьогоднішній день, при дослідженні фізичних процесів на різних поверхнях (наприклад, зовнішня й внутрішня поверхня матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючої збірки ядерного реактора атомної електростанції¹; поверхня рельєфу напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача сонячної батареї²³), при виникненні на них пошкоджувальних дефектів, необхідно проводити якісну й кількісну оцінку структурно-фазового стану у всьому об'ємі матеріалу. У завдання оцінювання входить, визначення критерію стану структур, при зміні геометричних характеристик в залежності від реальної площі поверхні матеріалу зі структурою з локальними неоднорідностями, мікропорами й макротріщинами, які в наслідку утворюють наскрізні тріщини. Як відомо⁴⁵, такі дисипативні структури, мають властивості

¹ Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Тимошенко О. А. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елемента для підвищення безпеки ядерного реактора // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоєфективність : зб. наук. пр. / Нац.тех. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Харків : НТУ «ХП», 2020. – № 1(1). – С. 26-31. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.04>.

² Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 3/8(111). P.75-89.<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>.

³ Кирисов І.Г., Буданов П.Ф., Хом'як Е.А., Бровко К.Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента, Вісник ВП, вип. 1, с. 35–38, Берез. 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38>

⁴ Федер Е. Фракталы [Текст] / Е. Федер; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: УРСС: Ленанд, 2014. – 256 с. <http://www.prometeus.nsc.ru/acquisitions/15-04-14/cont01.ssi>

⁵ Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 5/5(95). P. 20 – 28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144925>

масштабованості, інваріантності і фрактальності, а отже, можуть характеризуватися кількісною величиною – фрактальною розмірністю. Крім того, у сучасних методиках розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні, як правило вводяться обмеження і припущення, щодо геометричних прирощень, що приводить до наближених і неточних характеристик у використовуваних системах і пристроях, а, отже, до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації⁶⁷.

Тому, постає питання, щодо застосування та розвитку сучасних підходів з вдосконалення методів оцінювання критеріїв стану поверхні матеріалу з пошкодженою поверхнею, на основі застосування апарата фрактально-кластерної геометрії.

На теперішній час існує багато методів контролю пошкодження поверхні матеріалу⁸. До них відносяться методи руйнуючого та не руйнуючого контролю: капілярні, радіографічні, радіохвильові, мас-спектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні, вихорострумової дефектоскопії й т.д.⁹.

Однак даним методам властиві характерні недоліки¹⁰:

– прийняті обмеження та припущення по усередненню геометричних характеристик поверхні матеріалу;

⁶ Abdul R. K., Afzal R. A., Mohammed A. D., Ramis M. K. Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation // Progress in Nuclear Energy. 2019. V. 111. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.013>

⁷ Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs) // Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition). 2021. P. 95-115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823916-2.00005-9>

⁸ Хом'як Е.А., Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Кирисов І.Г. Сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента, Вісник ВПІ, вип. 3, с. 11–16, Черв. 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-11-16>

⁹ Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Хом'як Е. А. Методи контролю герметичності твел для підвищення ядерної безпеки АЕС // Молодь і технічний прогрес в АПК :Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Том 2. – Харків:ХНТУСГ, 2019. – С. 230. https://khntusg.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/molod_2019.pdf

¹⁰ Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Жуков С.Ф., Хом'як Е.А. Розробка методу контролю оболонки твел для підвищення безпеки ядерного реактора. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) Ч. 2 № 2 2021. С 49-54. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/08>

– при накопичення пошкоджень поверхні, враховується вплив тільки послідовності сукупностей умов при впливі зовнішніх пошкоджувальних дефектів;

– у якості основного фізичного процесу накопичення пошкоджень, як правило, розглядається процес повзучості матеріалу, без обліку структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації елементів;

– розрахунок пошкодження оболонки, розраховується по граничних умовах, тільки для самого напруженого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті на поверхні матеріалу, що вносить значні усереднення та погрішності в розрахунки.

Таким чином, на сьогоднішній день, недостатньо повно розроблені методи контролю і оцінки стану структури матеріалу з пошкодженою поверхнею, що вимагає їхнього вдосконалення, для визначення критерію якісної та кількісної оцінки структурно-фазового стану в повному об'ємі структури матеріалу. Тому, метою роботи є вдосконалення методу оцінювання критерію стану структури матеріалу з пошкодженою поверхнею на основі застосування апарата фрактально-кластерної геометрії¹¹.

1. Застосування фрактальної теорії для моделювання фізичних процесів, що відбуваються на поверхні матеріалу оболонки

Моделювання фізичних процесів, що відбуваються на поверхні різних матеріалів (напівпровідники, сплави металів і т.п), традиційними методами, представляється дуже складним і практично неможливим завданням.

Для опису процесів, що відбуваються в геометричному об'ємі структури матеріалу на його внутрішній і зовнішній поверхні, при утворенні у них мікропор і мікротріщин, запропоновано використати обчислювальний апарат фрактально-кластерної теорії.

Це дозволить одержати залежності геометричних розмірів мікропор і мікротріщин від зміни фрактальних величин.

¹¹ Фрактальна геометрія: навчальний посібник / Н. І. Мазуренко – Івано-Франківськ, 2010. – 65 с. [https://katg.pnu.edu.ua › uploads › sites › 2020/02](https://katg.pnu.edu.ua/uploads/sites/2020/02)

Розглянемо теоретичні основи, застосування фрактальної теорії¹², для опису процесів, що протікають в об'ємі структури матеріалу з пошкоджувальними дефектами реальної поверхні.

При фізико-хімічних процесах, що протікають на поверхнях матеріалу, відбуваються реакції по взаємодії зовнішніх факторів (наприклад, у вигляді різних інертних газів; світлового потоку і т.п.) з поверхнею.

У результаті такого процесу, в об'ємній структурі матеріалу, утворюється мікроскопічні локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини.

Згідно фрактально-кластерної теорії¹³, вільний поровий простір, можна представити у вигляді окремих кластерів (наприклад, мікропора в структурі матеріалу із цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ, заповнена молекулами газу гелію), які при розширенні порового простору, поєднуються і утворюють макроскопічні твердотільні системи, що складаються із кластерних агрегацій мікропор і кластерні агрегації макротріщин, що мають дробову розмірність (рис. 1). З цього випливає, що об'єм структури матеріалу з пошкодженою поверхнею, можна представити, як кластер-кластерну агрегацію порового простору, що складає із кластерних агрегацій мікропор і макротріщин (рис. 1). Таким чином, для оцінки стану структури матеріалу з пошкодженою поверхнею, у роботі запропоновано, як критерій утворення наскрізної тріщини, приймати час утворення загального кластера (кластер-кластерної агрегації порового простору), що з'єднує зовнішню і внутрішню поверхні.

Утворення кластер-кластерної агрегації відбувається при злитті кластерів молекул газу (гелію) різних розмірів і форм у мікропорах (рис. 1).

На структуру і геометричні властивості кластер-кластерної агрегації впливають умови протікання процесу в об'ємі неоднорідної структури поверхневої плівки, а також характеристики вихідних кластерів молекул газу (гелію), тобто їх розподіл по розмірах. Тому, за основу при моделюванні процесу виникнення та росту кластер-кластерної агрегації, а також дослідження її властивостей, покладені умови при яких формується кластер-кластерна агрегація і

¹² Демченко В.В., Бородавка С.В. Геометричне моделювання і комп'ютерна графіка. – К.: КНУБА, 2010. – 288 с. https://www.knuba.edu.ua/ukr/wpcontent/uploads/2021/01/Інформаційні_системи_технології.pdf

¹³ Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – New York: W. H. Freeman & Co., 2000. – 468 p. <https://doi.org/10.1002/esp.3290080415>

відбуваються початкові структурно – геометричні розподіли структурно утворюючих елементів – кластерів. Необхідно відзначити, що об’ємна структура кластер-кластерної агрегації, має специфічні фрактальні властивості, та характеризується і оцінюється ступенем заповнення об’ємом простору кластер-кластерної агрегації з використанням фрактальної розмірності.

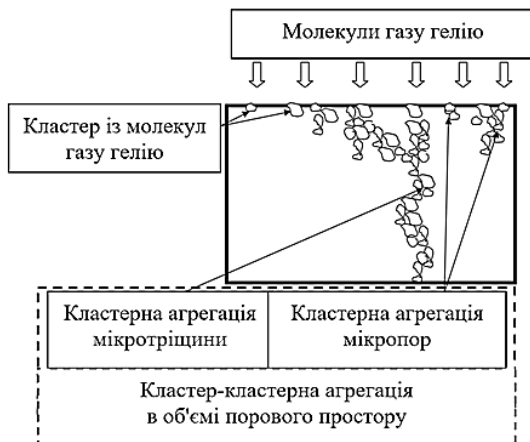


Рис. 1. Процес утворення кластер-кластерної агрегації в об’ємі структури матеріалу з пошкодженою поверхнею

Зміна величини фрактальної розмірності в об’ємній структурі поверхні матеріалу, дозволяє бачити динаміку процесу утворення фрактальної структури кластер-кластерної агрегації, а, отже, оцінювати збільшення і ріст геометричних параметрів.

Таким чином, моделювання фізичного процесу на поверхні матеріалу (наприклад, поверхня цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ; рельєф напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача сонячної батареї), дозволяє досліджувати залежність геометричних параметрів (об’єм, радіус) кластер-кластерних агрегацій, а, отже, і розмірів мікротріщин у структурі матеріалу, від зміни величини фрактальної розмірності. Це дозволить, у режимі реального часу, відслідковувати утворення наскрізних тріщин в

оболонках ТВЕЛ на ранніх стадіях і тим самим запобігти важким аваріям і катастрофи на АЕС¹⁴.

2. Розробка фрактальної моделі наскрізної тріщини у структурі матеріалу з пошкодженою оболонкою ТВЕЛ

Для оцінки часу утворення наскрізної тріщини у структурі матеріалу з пошкодженою поверхнею, запропоновано удосконалений метод, на основі застосування фрактально-кластерної теорії.

Проведення оцінки часу утворення наскрізної тріщини в оболонці ТВЕЛ, з нанодисперсної об'ємної фрактальної структурою, було запропоновано проводити на основі фрактально-кластерної теорії, при цьому необхідно враховувати те, що перевищення встановленого порогу концентрації небезпечних газів (гелію) і їхніх сумішей, відбувається при формуванні в порах структури матеріалу, газових кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію.

Отже, швидкість і швидкодія утворення наскрізних тріщин у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, буде визначатися швидкістю формування зазначених газових кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію.

Виходячи із цього, для оцінки швидкості і швидкодії утворення наскрізної тріщини, може бути запропоновано, удосконалений аналітичний вираз, що забезпечує розрахунок часу формування (росту) фрактального кластера з молекул гелію.

Поряд з розумінням фізичної природи формування кластерів, важливе значення для аналізу цього процесу, має оцінка часу, за яке гелієвий кластер може сформуватися.

На основі таких оцінок, можна зробити висновок про можливість утворення кластера з фрактальною структурою в конкретній фізичній ситуації при наявності набору конкуруючих процесів.

Розглянемо фізичний процес, коли в початковий момент часу, розглянута речовина перебуває у вигляді газу в нескінченному середовищі (рис. 1).

Далі із цього газу формуються частки певних розмірів. Звернемо увагу на стадію, коли ці частки поєднуються в кластер. Процес закінчується, коли кластер стає нескінченно великим. Наприклад, якщо має місце кластер-кластерна агрегація, то процес закінчується, якщо

¹⁴ Pelykh S. N., Maksimov M.V., Baskakov V.E. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. 2013. Iss. 58. P. 188-197. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6963>

окремі кластери стають настільки великими та розрідженими, що торкаються один одного і займають весь об'єм структури матеріалу.

Таким чином, середня щільність матеріалу в кластері рівняється середньої щільності матеріалу в об'ємі, що у процесі формування кластера не змінюється. Тим самим кластери поєднуються в один кластер нескінченних розмірів (рис. 1).

Відзначимо, що дана стадія процесу є більш повільною у порівнянні з першою стадією – утворенням макрочасток з газу (гелію).

Дійсно, формування кластера з макрочасток, визначається рухом макрочасток у середовищі, тоді як утворення макрочасток з газу – рухом атомів або молекул речовини. Тим самим, час утворення кластера при релаксації газу, визначається швидкістю другої фази – утворенням кластера з макрочасток. Таким чином, розглянутий процес об'єднання макрочасток у кластер моделює процес релаксації газу з утворенням кластерів.

При розрахунку часу формування кластерів, вводиться припущення, що частки роблять дифузійний рух у середовищі, і для механізму утворення кластера, скористаємося фізичною моделлю, показаною на рис. 1.

Як видно, з рис. 1, кластер у структурі матеріалу росте в міру прилипання до нього окремих часток або коли частки поєднуються в кластери, таким чином має місце кластер-кластерна агрегація.

У результаті виникає багато кластерів, які з'єднуються один з одним, так, що згодом характерний розмір кластерів росте, а число їх падає.

Для спрощення математичних викладень припустимо, що частки сферичні і мають той самий розмір, крім того, будемо вважати, що зіткнення часток або кластерів приводить до їх об'єднання.

Варто враховувати дифузійний рух часток у середовищі, а також дифузійний рух кластерів і їх падіння в середовищі під дією сили ваги.

При цьому, для простоти будемо вважати, що опір середовища кластеру таке ж, як для сферичної частки радіусом, що відповідає розміру кластера.

У рамках цих припущень, знайдемо кількісні характеристики процесу, коли кластер росте за рахунок прилипання до нього окремих часток.

$$dn / dt = v_0 + v_1, \quad (1)$$

де $v_0 = 4\pi\partial RN$ – частота прилипання до кластера часток, що роблять броунівський рух;

∂ – коефіцієнт дифузії часток у середовищі;

N – їх число в одиниці об'єму);

v_1 – частота захвату кластером часток у результаті його падіння у поле сил ваги;

R – радіус кластера.

Нехай радіус кластера R і число часток у ньому n відповідно зв'язані співвідношенням (2):

$$n = (R / r_0)^{d_f}, \quad (2)$$

де n – число часток у кластері;

r_0 – радіус окремої частки;

d_f – фрактальна розмірність кластера.

Використовуючи формулу Стокса, що описує коефіцієнт дифузії у випадку, коли розмір часток перевищує довжину пробігу молекул у середовищі можна одержати вираз (3):

$$v_0 = k_0 N n^{1/d_f}, \quad (3)$$

де константа швидкості $k_0 = 2T / 3\eta$ не залежить від матеріалу й розміру часток. Для повітря при $T = 300K$, ця величина дорівнює $1,5 \dots 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Частота захвату часток падаючим кластером визначається по формулі (4):

$$v_1 = \pi R^2 v N, \quad (4)$$

де $v = \frac{2\rho r_0^2 g}{9\eta}$ – швидкість падіння кластера під дією сили ваги;

ρ – різниця щільностей матеріалу часток і середовища при моделюванні кластера круглою часткою).

При цьому, уводиться умова, що пори в кластері зайняті матеріалом середовища, у якому він росте.

Тоді з урахуванням цього, перетворимо вираз (4), до наступного виду:

$$v_1 = k_1 N n^{\frac{d_f+1}{d_f}}, \quad \text{при } k_1 = \frac{2\pi\rho g r_0^4}{9\eta}. \quad (5)$$

Підставляючи значення виражень (4) і (5) у рівняння (1), отримаємо аналітичний вираз (6) для часу росту кластера наскрізної тріщини:

$$t = \frac{1}{N} \int \frac{dn}{k_0 n^{1/d_f} + k_1 n^{1+1/d_f}}. \quad (6)$$

Враховуючи, що $k_0 > k_1$, одержуємо, що цей інтеграл в основному сходиться при $n \sim k_0 > k_1 > 1$, так що в якості нижньої й верхньої меж в (6) можна підставити відповідно нуль і нескінченність.

Обчислюючи інтеграл у припущенні, що число часток в утвореному кластері n значно перевищує відношення k_0 / k_1 , одержуємо час формування фрактальної структури матеріалу з пошкодженою поверхнею (7):

$$t = \frac{\pi}{N k_0^{1/d_f} k_1^{1-1/d_f} \sin\left(n/d_f\right)}. \quad (7)$$

У міру укрупнення кластера середня густина речовини в ньому знижується. Коли кластери досягнуть характерних розмірів \bar{R} , при яких середня густина речовини в ньому стане порядку середньої густини речовини в об'ємі, вони будуть займати весь об'єм.

Тоді можна одержати наступну оцінку для часу формування структури матеріалу з пошкодженою поверхнею (8):

$$t \approx \frac{\bar{n}_0}{N_0 k_0 a_0} \approx \frac{1}{N_0 k_0 a_0} \left(\frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right)^{d_f/(3d_f)}, \quad (8)$$

де ρ_0 – масова щільність матеріалу часток (наприклад, молекули гелію);

$\bar{\rho}$ – середня масова густина речовини в об'ємі;

\bar{n}_0 – середнє число часток у кластері, якщо кластери заповнюють весь об'єм.

Розглянуті аналітичні вирази (7) і (8), моделі формування кластера, відповідають припущенню, що ймовірність злипання часток (молекул гелію) при їх зіткненні не мала, так що частки поєднуються після зіткнення.

Можливо, це відбувається після багатьох зіткнень, тобто ймовірність злипання мала, але частки з'єднуються до того, як розійтися на більші відстані в результаті дифузійного руху.

Таке припущення відповідає моделі формування кластера структури матеріалу з пошкодженою поверхнею.

Варто помітити, що в реальній ситуації, кластери можуть бути отримані із часток невеликих розмірів при високій концентрації матеріалу в середовищі, для утворення наскрізної тріщини.

Однак, якщо час формування кластера досить значний, то процеси, пов'язані з віднесенням матеріалу з досліджуваного обсягу, не дадуть сформуватися кластеру, тобто не буде утворена наскрізна тріщина.

Таким чином, для проведення оцінки критерію стану об'ємної фрактальної структури, при розрахунку часу формування (швидкості наростання) кластер-кластерної агрегації, необхідно враховувати загальну фрактальну розмірність d_f^Σ зовнішньої й внутрішньої поверхні матеріалу, що, за результатами даних отриманих при проведенні експерименту із використанням скін-ефекту, визначається виразом (9):

$$d_f^\Sigma = 2 \ln \frac{R_{el}}{\omega} \quad (9)$$

де $R_{el} = R_{ext} + R_{int}$ – загальний електричний опір проводячого матеріалу (R_{ext} – електричний опір на зовнішній (внутрішній (R_{int})) поверхні);

ω – резонансна частота коливань часток), що дозволяє записати співвідношення (8) у вигляді виразу (10):

$$t \approx \frac{n_0^{\frac{3}{2} - \ell n \frac{\omega}{R_{el}}}}{N_0 k_0} \quad (10)$$

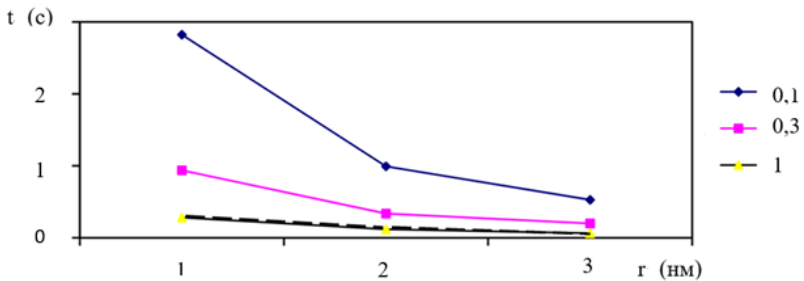
У таблиці 1, представлені дані обчислювального експерименту, розраховані по формулі (8), для значень часу формування кластера і відповідні йому значення радіуса часток і первісної щільності матеріалу.

На рис. 2, показані залежності часу росту кластера від радіуса часток і первісної щільності структури матеріалу. Із графіків (рис. 2), випливає, що чим більше радіус частки і більше первісна щільність матеріалу, тим швидше формується й росте кластер наскрізної тріщини у фрактальній структурі.

Таблиця 1

Дані для значень часу формування кластера наскрізної тріщини

Первісна щільність ρ (кг/м ³)	Час росту кластера фрактальної структури t (у секундах)		
	r (у нанометрах)		
	1	2	3
0,1	2,806975	0,975348	0,525552
0,3	0,935658	0,325116	0,175184
1,0	0,280698	0,097535	0,052555

**Рис. 2. Залежність часу росту кластера від радіуса часток та первісної щільності матеріалу**

Таким чином, на підставі статистичного моделювання і проведених розрахунків було встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах, може бути використано, як оцінка критерію стану пошкодженої поверхні матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючого складання ядерного реактора атомної електростанції, залежно від концентрації часток (молекул гелію) у кластері наскрізної тріщини, і може коливатися в межах від мільйонів секунд до одиниць секунд, що підтверджується результатами обчислювального експерименту.

ВИСНОВКИ

Показано, що в сучасних методах контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючої збірки ядерного реактора атомної електростанції, для розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу, як правило, вводяться обмеження та припущення, щодо геометричних прирощень, що призводять до наближених і неточних характеристик у

використовуваних системах і пристроях, а, отже, до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації.

Розглянуті підходи з оцінки критерію стану структури матеріалу з пошкоджувальними дефектами, на її зовнішній і внутрішній поверхні.

Проведено аналіз і окремо виділені основні проблеми при моделюванні фізичних процесів на реальних геометричних поверхнях об'ємної структури, які залежать від зовнішніх і внутрішніх пошкоджувальних дефектів, і впливають на оцінку критерію стану структури матеріалу.

Показано, що ступінь пошкодження та руйнування поверхні матеріалу, залежить від формування і росту кластер-кластерних агрегацій мікропор і макротріщин в об'ємі структури матеріалу.

Запропоновано, в якості оцінки критерію стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, яка має властивості масштабованості, інваріантності і фрактальності, використати величину фрактальної розмірності, що є кількісною величиною ступеня заповнення структури поверхні матеріалу.

Запропоновано використати обчислювальний апарат фрактально-кластерної теорії, для опису процесів, що відбуваються в геометричному об'ємі структури матеріалу на його внутрішній і зовнішній поверхні, при утворенні у них мікропор і макротріщин, що дозволить одержати залежності геометричних розмірів мікропор і макротріщин від зміни фрактальних величин

На основі застосування обчислювального апарата фрактально-кластерної геометрії, отримані вдосконалені аналітичні вирази з визначення часу формування і росту загального кластера наскрізної тріщини в об'ємі структури матеріалу із фрактальною поверхнею.

Встановлено, що ріст і швидкодія утворення наскрізних тріщин у структурі матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента, буде визначатися швидкістю формування газових кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію.

Обґрунтовано, що такий підхід, дає можливість у динаміці, проводити оцінку критерію стану фрактальних структур і тим самим забезпечувати контроль пошкодження поверхні матеріалу, у режимі реального часу.

Встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій з молекул гелію у фрактальних структурах, може бути використаний, як критерій стану пошкодженої структури матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючої збірки ядерного

реактора. При цьому, експериментально встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах, залежить від концентрації часток (молекул гелію) у кластері та коливається в межах від міль секунд до одиниць секунд.

АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз сучасного підходу до вдосконалення методів контролю пошкодження оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора атомної електростанції. Показано, що існуючі методи контролю герметичності оболонки, недостатньо повно забезпечують виконання вимог, щодо оцінки стану пошкодження структури матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента. Проведено дослідження, для визначення критерію якісної та кількісної оцінки структурно-фазового стану у повному об'ємі структури оболонки з ушкодженою поверхнею, на основі застосування апарату фрактально-кластерної теорії. Обрана величина фрактальної розмірності, як кількісний критерій оцінки стану пошкодженої поверхні оболонки. Отримано фрактальну модель макротріщини, яка дозволяє відстежувати динаміку розвитку наскрізної тріщини в структурі матеріалу оболонки тепловиділяючого елемента, в режимі реального часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Хом'як Е. А., Тимошенко О. А. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елемента для підвищення безпеки ядерного реактора // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. / Нац.тех. ун-т «Харків. політехн. ін.-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – № 1(1). – С. 26-31. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.04>.

2. Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 3/8(111). P.75-89. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>

3. Кирисов І.Г., Буданов П.Ф., Хом'як Е.О., Бровко К.Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 35–38, Берез. 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38>

4. Федер Е. Фрактали [Текст] / Е. Федер; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: УРСС: Ленанд, 2014. – 256 с. <http://www.prometeus.nsc.ru/acquisitions/15-04-14/cont01.ssi>

5. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5/5(95). P. 20 – 28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144925>

6. Abdul R. K., Afzal R. A., Mohammed A. D., Ramis M. K. Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation // *Progress in Nuclear Energy*. 2019. V. 111. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.013>

7. Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs) // *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors (Second Edition)*. 2021. P. 95-115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823916-2.00005-9>

8. Хом'як Е.А., Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Кирисов І.Г. Сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента, Вісник ВПІ, вип. 3, с. 11–16, Черв. 2022. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-162-3-11-16>

9. Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Хом'як Е. А. Методи контролю герметичності твел для підвищення ядерної безпеки АЕС // Молодь і технічний прогрес в АПК :Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Том 2. – Харків:ХНТУСГ, 2019. – С. 230. https://khntusg.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/molod_2019.pdf

10. Буданов П.Ф., Бровко К.Ю., Жуков С.Ф., Хом'як Е.А. Розробка методу контролю оболонки твел для підвищення безпеки ядерного реактора. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) Ч. 2 № 2 2021. С 49-54. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/08>

11. Фрактальна геометрія : навчальний посібник / Н. І. Мазуренко – Івано-Франківськ, 2010. – 65 с. [https://katg.pnu.edu.ua > uploads > sites > 2020/02](https://katg.pnu.edu.ua/uploads/sites/2020/02)

12. Демченко В.В., Бородавка Є.В. Геометричне моделювання і комп'ютерна графіка. – К.: КНУБА,2010. – 288 с. https://www.knuba.edu.ua/ukr/wpcontent/uploads/2021/01/Інформаційн_і_системи_технології.pdf

13. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – New York: W. H. Freeman & Co., 2000. – 468 p. <https://doi.org/10.1002/esp.3290080415>

14. Pelykh S. N., Maksimov M. V., Baskakov V. E. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. 2013. Iss. 58. P. 188-197. <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6963>

Information about the authors:

Budanov Pavlo Feofanovych,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Physics, Electrical Engineering
and Power Engineering
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
16, Universitetska str., Kharkiv, 61003, Ukraine

Khomyak Eduard Anatoliyovych,

Postgraduate Student at the Department of Physics, Electrical
Engineering and Power Engineering
Teaching Assistant at the Department of Physics, Electrical Engineering
and Power Engineering
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
16, Universitetska str., Kharkiv, 61003, Ukraine

Kirisov Igor Gennadiyovych,

Postgraduate Student at the Department of Physics, Electrical
Engineering and Power Engineering
Senior Teacher at the Department of Physics, Electrical Engineering and
Power Engineering
Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy
16, Universitetska str., Kharkiv, 61003, Ukraine