

μ_0 – магнітна постійна матеріалу;

ω – частота змінного електричного потенціалу;

σ – електропровідність матеріалу.

Таким чином, викладені вище міркування щодо масштабної інваріантності досліджуваної структури фізичної моделі оболонки ТВЕЛ показують, що скін-ефект є перспективним засобом вимірювання фрактальних розмірностей геометричних параметрів оболонки геометричної фігури у вигляді порожнистого циліндра.

2.2.3 Дослідження геометричних параметрів фізичної моделі ТВЕЛ з використанням апарату фрактальної геометрії

Відповідно до теорії фракталів [60 – 76], для довільної фрактальної зовнішньої та внутрішньої поверхні порожнистого циліндра повинні виконуватися такі нерівності (2.2) і (2.3):

$$S_f^{ext} \neq h_{geom}^{ext} \cdot \ell_{geom}^{ext} \quad (2.2)$$

$$S_f^{int} \neq h_{geom}^{int} \cdot \ell_{geom}^{int} \quad (2.3)$$

Отже, на підставі виразів (2.2) та (2.3), для загальної фрактальної площі всієї поверхні порожнистого циліндра $\sum S_{geom}$, має виконуватися така нерівність (2.4):

$$\sum S_f \neq S_f^{ext} + S_f^{int} \neq (h_{geom}^{ext} \cdot \ell_{geom}^{ext}) + (h_{geom}^{int} \cdot \ell_{geom}^{int}) \quad (2.4)$$

Згідно з теорією фракталів [60 – 76], величина довжини порожнистого циліндра, яка відрізняється від геометричної довжини, на величину деякого геометричного збільшення, є фрактальною величиною цієї довжини.

Отже, маємо фрактальні величини поздовжніх h_f^{ext}, h_f^{int} та поперечних $\ell_f^{ext}, \ell_f^{int}$ довжин, які породжують на зовнішній S_f^{ext} та внутрішній S_f^{int} фрактальній поверхні

порожнього циліндра, фрактальні розмірності $d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}, d_{\ell_f^{ext}}, d_{\ell_f^{int}}, d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}}$ для геометричних параметрів ТВЕЛ.

Тому їх можна задати такими виразами:

$$d_{h_f^{ext}} = \frac{\ln(h_f^{ext} / \delta_{ext})}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.5)$$

звідки випливає, що висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки, визначається виразом (2.6):

$$h_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 1}}; \quad (2.6)$$

$$d_{h_f^{int}} = \frac{\ln(h_f^{int} / \delta_{int})}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.7)$$

звідки висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки, визначається виразом (2.8):

$$h_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 1}}; \quad (2.8)$$

$$d_{\ell_f^{ext}} = \frac{\ln(\ell_f^{ext} / \delta_{ext})}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.9)$$

звідки випливає, що поперечна довжина ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні товщини оболонки, визначається виразом (2.10):

$$\ell_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 1}}; \quad (2.10)$$

$$d_{\ell_f^{int}} = \frac{\ln(\ell_f^{int} / \delta_{int})}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.11)$$

звідки слідує, що поперечна довжина ТВЕЛ з фрактальним прирощенням по внутрішній поверхні товщини оболонки, визначається виразом (2.12):

$$\ell_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 1}}; \quad (2.12)$$

$$d_{S_f^{ext}} = \frac{\ln(S_f^{ext} / \delta_{ext}^2)}{\ln(1 / \delta_{ext})}; \quad (2.13)$$

звідки випливає, що площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки; визначається виразом (2.14):

$$S_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}} - 2}}; \quad (2.14)$$

$$d_{S_f^{int}} = \frac{\ln(S_f^{int} / \delta_{int}^2)}{\ln(1 / \delta_{int})}; \quad (2.15)$$

звідки випливає, що площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки визначається виразом (2.16):

$$S_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int}^{d_{h_f^{int}} - 2}}. \quad (2.16)$$

де $d_{h_f^{ext}}$ – величина фрактальної розмірності висоти ТВЕЛ по зовнішній поверхні оболонці;

$d_{h_f^{int}}$ – величина фрактальної розмірності висоти ТВЕЛ по внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ;

$d_{S_f^{ext}}$ – величина фрактальної розмірності площі зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ;

$d_{S_f^{int}}$ – величина фрактальної розмірності площі внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ;

h_f^{ext} – висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки;

h_f^{int} – висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки;

S_f^{ext} – площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки;

S_f^{int} – площа ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній поверхні оболонки;

δ_{ext} – глибина скін-шару на зовнішній поверхні оболонки порожнистого циліндра;

δ_{int} – глибина скін-шару на внутрішній поверхні оболонки порожнистого циліндра.

Підставляючи вирази (2.14) і (2.16) у вираз (2.4), отримуємо аналітичний вираз (2.17) для розрахунку загальної фрактальної площі $\sum S_f$ для внутрішньої та зовнішньої поверхні фізичної моделі порожнистого циліндра:

$$\sum S_f = \frac{1}{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-2}} + \frac{1}{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}}-2}}. \quad (2.17)$$

Якщо абстрагуватися від розгляду характеру фрактальних розмірностей на зовнішній та внутрішній поверхнях фізичної моделі порожнистого циліндра, то у загальному випадку справедливі нерівності:

1. $1 \leq d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}, d_{\ell_f^{ext}}, d_{\ell_f^{int}} < 2$ (рівність виконується для гладких кривих, що диференціюються);
2. $2 \leq d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}} < 3$ (рівність виконується для гладких поверхонь, що диференціюються).

2.3 Дослідження моделі ушкодженості та деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

2.3.1 Дослідження моделі ушкодженості оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

Як відомо [147, 252 – 254], при контролі розгерметизації оболонки ТВЕЛ, визначення параметра ушкодженості оболонки ТВЕЛ визначається виразом (2.18):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (2.18)$$

де $\omega(\tau)$ – параметр ушкодженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ;

A_0 – питома розсіювання енергії, що характеризує неушкодженість структури матеріалу оболонки ТВЕЛ;

$A(\tau)$ – питома розсіювання енергії, що характеризує інтенсивність ушкодження структури матеріалу оболонки ТВЕЛ за час τ і визначається виразом (2.19):

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) dr, \quad (2.19)$$

де $W(\tau)$ – питома потужність розсіювання, що характеризує інтенсивність процесу повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ у будь-який момент часу та визначається виразом (2.20):

$$W(\tau) = G_e \cdot \rho_e, \quad (2.20)$$

де ρ_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ.

G_e – еквівалентна напруга, найпростішої одновимірної моделі, при допущенні ізотропності матеріалу оболонки ТВЕЛ, визначається виразом (2.21):

$$G_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(G_\theta - G_r)^2 + (G_r - G_z)^2 + (G_z - G_\theta)^2 \right]}, \quad (2.21)$$

де G_θ, G_r, G_z – напруги у напрямках координат θ, r, z .

Еквівалентна деформація повзучості оболонки ТВЕЛ для всіх розглянутих режимів навантаження ядерного реактора типу ВВЕР-1000 поступово збільшується з часом.

Тому швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки розраховується з урахуванням радіаційних ефектів і подається у вигляді функції від параметрів, показаної у виразі (2.22):

$$\rho_e = K \cdot \Phi \left(G_e + B \cdot e^{C \sigma_e} \right) \cdot \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2}, \quad (2.22)$$

де ρ_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості матеріалу оболонки ТВЕЛ, c^{-1} ;

Φ – щільність потоку швидких нейтронів, $1/\text{м}^2\cdot\text{с}$;

T – температура, К;

R – газова постійна;

G_e – еквівалентна напруга, Па;

t – час протікання деформації, с;

$K = 5,129 \cdot 10^{-29}$; $B = 7,252 \cdot 10^2$; $C = 4,967 \cdot 10^{-8}$ – безрозмірні коефіцієнти.

Згідно із законом розподілу нейтронного потоку за довжиною ТВЕЛ, щільність потоку швидких нейтронів $\Phi(z)$ на аксіальному сегменті z ($0 \leq z \leq H_{geom}$), визначається виразом (2.23):

$$\Phi(z) = \cos \left[\frac{\pi}{H_{ef}} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right], \quad (2.23)$$

де H_{geom} – геометрична довжина (висота) ТВЕЛ;

z – аксіальний сегмент, тобто ділянка довжини ТВЕЛ, для визначення щільності потоку швидких нейтронів $\Phi(z)$;

$H_{ef} = H_{geom} + 2\delta_{ef}$ – передбачувана довжина (висота) ТВЕЛ з урахуванням величини ефективної добавки ($\delta_{ef} \approx 10$ см).

Як показує практика, розрахунки передбачуваної довжини (висоти) ТВЕЛ H_{ef} з урахуванням величини ефективної добавки δ_{ef} , згідно з виразом (2.23), мають дуже приблизний характер.

Крім того, це в цілому призводить до похибок у обчисленнях основних прийнятих режимних характеристик при роботі ядерного реактора ВВЕР-1000, таких як: щільність потоку швидких нейтронів; лінійного питомого енерговиділення та ін.

Тому, в моделях ушкодженості оболонки ТВЕЛ, необхідно враховувати реальне збільшення (подовження) висоти ТВЕЛ, внаслідок розтягування, розбухання і повзучості оболонки, під впливом ушкоджуючих дефектів.

При цьому, у матеріалі оболонки, відбуваються структурно-фазові зміни, з утворенням локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин, а, отже, така структура згідно [60 – 76], має фрактальні властивості.

Таким чином, з урахуванням вищесказаного, при розрахунку реальної довжини ТВЕЛ, у роботі запропоновано, враховувати її фрактальне збільшення, згідно з виразом (2.24):

$$H_f = H_{geom} + \Delta H_f, \quad (2.24)$$

де H_f – фрактальна (реальна) довжина ТВЕЛ;

ΔH_f – фрактальне прирощення довжини ТВЕЛ.

Тоді, ґрунтуючись на сказаному вище, вираз (2.23) набуде вигляду (2.25):

$$\Phi(z) = \cos \left[\frac{\pi}{H_{geom} + \Delta H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] = \cos \left[\frac{\pi}{H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right]. \quad (2.25)$$

Підставляючи проміжні вирази (2.20 – 2.25), у формулу (2.18) та перетворивши її до аналітичного вигляду (2.26), отримуємо вдосконалену математичну модель, для визначення параметра ушкодженості оболонки ТВЕЛ з урахуванням фрактальної довжини:

$$\omega(\tau) = \frac{1}{A_0} \int_0^\tau \left\{ \begin{array}{l} G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{H_f} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \times \\ \times \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \cdot \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \end{array} \right\} \cdot dr \quad (2.26)$$

Для знаходження фрактальної довжини H_f ТВЕЛ, у роботі запропоновано використовувати апарат фрактальної геометрії, на прикладі фізичної моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра, як було показано у підрозділі 2.1.3.

Для цього було запропоновано використовувати вираз (2.6) для визначення висота ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по зовнішній поверхні оболонки та вираз (2.8) для визначення висоти ТВЕЛ з фрактальним збільшенням по внутрішній

поверхні оболонки.

Крім того, аналітичний вираз (2.26) можна прийняти як для умови руйнування оболонки ТВЕЛ так і для визначення критерію розгерметизації.

Тепловиділяючий елемент, можна вважати герметичним, при виконанні наступних умов ушкодження та руйнування оболонки (2.27):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} \leq 1, \quad (2.27)$$

при $H_f / H_{geom} \leq 1$.

Звідки, ТВЕЛ негерметичний, за умови ушкодження та руйнування оболонки (2.28):

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} > 1, \quad (2.28)$$

при $H_f / H_{geom} > 1$.

На основі вище викладених обґрунтувань були запропоновані аналітичні вирази, що визначають удосконалену модель ушкодження оболонки ТВЕЛ, на основі врахування фрактальних властивостей структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Підставляючи значення висоти ТВЕЛ, з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки з виразу (2.6) у вираз (2.26), отримуємо аналітичний вираз (2.27) для вдосконаленої моделі ушкодженості зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ на основі застосування апарату фрактальної геометрії:

З виразу (2.27) випливає, що ушкодженість зовнішньої поверхні оболонки залежить від зміни фрактальної розмірності $d_{h_f^{ext}}$ та величини глибини скін-шару δ_{ext} на зовнішній поверхні оболонки ТВЕЛ.

$$\omega_{ext}(\tau) = \frac{1}{A_0} \cdot \int_0^\tau \left\{ G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{1} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \times \right. \\ \left. \times \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \right\} \cdot dr \quad (2.27)$$

Аналогічним чином, підставляючи значення висоти ТВЕЛ з фрактальним збільшенням зовнішньої поверхні оболонки з виразу (2.8) у вираз (2.26), отримуємо аналітичний вираз (2.28) для визначення ушкодження внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ.

$$\omega_{int}(\tau) = \frac{1}{A_0} \cdot \int_0^\tau \left\{ G_e \cdot K \cdot \cos \left[\frac{\pi}{1} \left(z - \frac{H_{geom}}{2} \right) \right] \left(G_e + B \cdot e^{C \cdot \sigma_e} \right) \times \right. \\ \left. \times \exp(-10000 / R \cdot T) \cdot t^{-1/2} \right\} \cdot dr \quad (2.28)$$

З виразу (2.28) випливає, що ушкодженість внутрішньої поверхні оболонки залежить від зміни фрактальної розмірності $d_{h_f^{int}}$ та величини глибини скін-шару δ_{int} на внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ.

2.3.2 Дослідження моделі деформації оболонки ТВЕЛ у процесі його розгерметизації

При моделюванні процесу деформації структури матеріалу оболонки ТВЕЛ (наприклад: матеріал із сплаву цирконію та номібію), необхідно враховувати також зміни робочої температури ($T = 360^{\circ} C$) та внутрішнього тиску ($P_{int} = 2,8 MPa$), викликаного накопиченням продуктів поділу ядерного палива у просторі між внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ та таблеткою ядерного палива.

Проведемо дослідження моделі деформації оболонки ТВЕЛ, з урахуванням робочих температури та тиску, яка як відомо [177, 180, 252], визначається формулою (2.29):

$$\sigma_T = \frac{P}{2\pi \cdot S_{geom}^s} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{int}^{geom}} \right) \quad (2.29)$$

де σ_T – показник деформації при $T = 360^0 \text{ C}$;

P – робочий тиск (2,8 МПа);

S_{geom}^s – геометрична площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ;

α – геометрична товщина стінки оболонки ТВЕЛ;

d_{geom}^{int} – внутрішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ.

З формули (2.29) видно, що в процесі деформації оболонки ТВЕЛ при подальших змінах величини температури ($T_{work} > 360^0 \text{ C}$) та тиску ($P_{work} > 2.8 \text{ МПа}$), не враховується зміна прирощень геометричних параметрів оболонки ТВЕЛ, яка відбувається в результаті повзучості, набухання, розтріскування структури матеріалу (Zr + 1 % Nb) оболонки ТВЕЛ.

З виразу (2.29) також видно, що не враховується динаміка зміни неоднорідності структури, тобто її структурно-фазовий стан, в залежності від появи локальних новоутворень, мікропор та макротріщин в об'ємі матеріалу оболонки ТВЕЛ. Як видно з (рис. 2.2), геометрична площа S_{geom}^s поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ визначається виразом (2.30):

$$S_{geom}^s = \frac{\pi}{4} (d_{ext}^2 - d_{int}^2) \quad (2.30)$$

де S_{geom}^s – площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ;

d_{ext} – зовнішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ;

d_{int} – внутрішній геометричний діаметр оболонки ТВЕЛ.

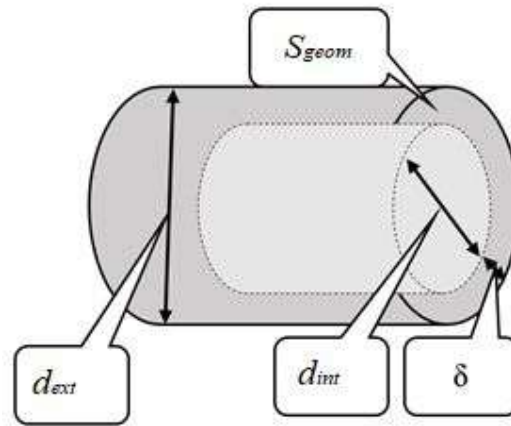


Рис. 2.2. Геометрична фігура порожнистого циліндра

Формула (2.30), може бути застосована лише для ідеально гладкої поверхні, не враховуючи впливу ушкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ, тобто при постійних значеннях зовнішнього та внутрішнього геометричного діаметра ушкодженої оболонки ТВЕЛ, а значить незмінною товщиною оболонки порожнистого циліндра.

Тому, з урахуванням вище сказаного, у роботі, була запропонована вдосконалена модель деформації структури оболонки ТВЕЛ з урахуванням неоднорідності її структури та з урахуванням використання апарату фрактально – кластерної геометрії, відповідно до виразу (2.31):

$$\sigma_T = \frac{P}{2\pi \cdot S_f^s} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{geom}^{int}} \right) \quad (2.31)$$

де S_f^s – фрактальна площа поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ, що враховує фрактальні збільшення товщини стінки оболонки ТВЕЛ.

Відомо, що зміна структурно-фазового стану відбувається по всій фрактальній поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, тому її фрактальна площа S_f^Σ буде включати

фрактальні площі бічної зовнішньої S_f^{ext} та внутрішньої S_f^{int} поверхні, а також загальну фрактальну площу S_f^s поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ, згідно з виразом (2.32):

$$S_f^\Sigma = (S_f^{ext} + S_f^{int}) + \Sigma S_f^s \quad (2.32)$$

Виходячи з виразу (2.32), можна визначити величину фрактальної площі поперечного перерізу стінки оболонки ТВЕЛ згідно (2.33):

$$S_f^s = \frac{S_f^\Sigma - (S_f^{ext} + S_f^{int})}{2} \quad (2.33)$$

Тоді підставляючи вираз (2.33) у (2.29), отримуємо формулу (2.34) для розрахунку показника деформації, з урахуванням фрактальної площі внутрішньої і зовнішньої поверхні ушкодженої оболонки ТВЕЛ:

$$\sigma_T = \frac{P}{\pi \cdot [S_f^\Sigma - (S_f^{ext} + S_f^{int})]} \left(1 + \frac{\alpha}{d_{geom}^{int}} \right). \quad (2.34)$$

Де:

$$S_f^\Sigma = 2\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) + 2\pi \cdot h_f (r_{ext} + r_{int}) \quad (2.35)$$

$$S_f^{ext} = \frac{1}{\delta_{ext} d_{S_f^{ext}}^{-2}} \quad (2.36)$$

$$S_f^{int} = \frac{1}{\delta_{int} \frac{d_{S_f^{int}}^{-2}}{d_{S_f^{int}}^{-2}}} \quad (2.37)$$

$$h_f = \frac{1}{\delta_{ext} \frac{d_{S_f^{ext}}^{-1}}{d_{S_f^{ext}}^{-1}}}; \quad (2.38)$$

З урахуванням співвідношень (2.35), (2.36), (2.37) і (2.38), перетворимо вираз (2.34) до наступного виду (2.39):

$$\sigma_r = \frac{P \left(1 + \frac{2\delta}{r_{int}} \right)}{\left\{ \left[4\pi^2 (r_{ext} + r_{int}) \left[(r_{ext} - r_{int}) + \left(\frac{1}{\delta_{ext} \frac{d_{S_f^{ext}}^{-1}}{d_{S_f^{ext}}^{-1}}} \right) \right] \right] \right\} - 2\pi \cdot \left(\frac{1}{\delta_{ext} \frac{d_{S_f^{ext}}^{-2}}{d_{S_f^{ext}}^{-2}}} + \frac{1}{\delta_{int} \frac{d_{S_f^{int}}^{-2}}{d_{S_f^{int}}^{-2}}} \right)} \quad (2.39)$$

З формули (2.39) видно, що в процесі деформації оболонки ТВЕЛ при подальших змінах величини температури ($T_{work} > 360$ °C) та тиску ($P_{work} > 2.8$ МПа), враховується зміна збільшення фрактальної величини площі товщини стінки оболонки ТВЕЛ у залежності від фрактальної розмірності зовнішньої $d_{S_f^{ext}}$ та внутрішньої $d_{S_f^{int}}$ поверхні по всій фрактальній висоті h_f оболонки ТВЕЛ.

При цьому необхідно відзначити, що зі зменшенням або збільшенням фрактального приросту товщини стінки оболонки, що впливає на його поперечний переріз, ступінь деформації завжди збільшується, так процес звуження або набухання впливає на форму і геометрію оболонки ТВЕЛ.

Це пояснюється тим, що площа поперечного перерізу оболонки ТВЕЛ, зменшується з допомогою збільшення пористості, тобто збільшення кількості мікропор та макротріщин у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ призводить до утворення кластер-кластерних агрегацій у пористій структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Основною кількісною величиною [181, 182], що характеризує ступінь заповненості простору площі поперечного перерізу оболонки S_f^s , є фрактальна розмірність товщини стінки оболонки порожнистого циліндра, яка визначатиметься з виразів (2.40) та (2.41), отриманих за результатами досліджень фізичної моделі оболонки у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра:

$$d_{S_f^{ext}} = \frac{\ln(S_f^{ext} / \delta_{ext}^2)}{\ln(1 / \delta_{ext})} \quad (2.40)$$

$$d_{S_f^{int}} = \frac{\ln(S_f^{int} / \delta_{int}^2)}{\ln(1 / \delta_{int})} \quad (2.41)$$

2.4 Дослідження фрактальної структури матеріалу оболонки порожнистого циліндра на основі скін-ефекту

Як відомо [182], енергія, що розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра, визначається виразом (2.42):

$$P_{\Sigma} = P_{ext} + P_{int}, \quad (2.42)$$

де P_{Σ} – енергія, яка розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра;

P_{ext} – енергія розсіювання зовнішньою поверхнею порожнистого циліндра, яка визначається виразом (2.43);

P_{int} – енергія розсіювання внутрішньою поверхнею порожнистого циліндра, яка визначається виразом (2.44).

$$P_{ext} = \int j_{ext}(r_{ext}) \cdot E_{ext}(r_{ext}) \cdot d_{ext}^3 \cdot r_{ext}, \quad (2.43)$$

$$P_{int} = \int j_{int}(r_{int}) \cdot E_{int}(r_{int}) \cdot d_{int}^3 \cdot r_{int}. \quad (2.44)$$

де $j_{ext}(r_{ext})$ – щільність струму на зовнішній поверхні зразка;

$j_{int}(r_{int})$ – щільність струму на внутрішній поверхні зразка;

$E_{ext}(r_{ext})$ – електричне поле в точці $r_{зовн}$, на зовнішній поверхні зразка;

$E_{int}(r_{int})$ – електричне поле в точці $r_{внутр}$, на внутрішній поверхні зразка;

r_{ext} – зовнішній радіус оболонки зразка порожнистого циліндра;

r_{int} – внутрішній радіус оболонки зразка порожнистого циліндра.

За законом Ома, щільність струму на поверхні провідника визначається як $j(r) = \sigma \cdot E(r)$, де σ – електропровідність, що дозволяє записати співвідношення (2.43) та (2.44), у вигляді виразів (2.45) та (2.46):

$$P_{ext} = \sigma_{ext} \int E_{ext}^2 \cdot d_{ext}^3 \cdot r_{ext} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \int d_{ext}^3 \cdot r_{ext} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext} \quad (2.45)$$

$$P_{int} = \sigma_{int} \int E_{int}^2 \cdot d_{int}^3 \cdot r_{int} = \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \int d_{int}^3 \cdot r_{int} = \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{int} \cdot \delta_{int} \quad (2.46)$$

де «скін» – означає об'єм $V \equiv \int_{skin} d^3 \cdot r = S \cdot \delta$ шару речовини, у якому електричне

поле істотно чиним відмінне від нуля, через те, що електричне поле зменшується експоненційно в міру просування в глиб матеріалу;

σ_{ext} – електропровідність на зовнішній поверхні провідника;

σ_{int} – електропровідність на внутрішній поверхні провідника.

Тоді, загальне значення енергії, що розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра P_{Σ} , визначається виразом (2.47):

$$P_{\Sigma} = \sigma_{ext} \cdot \langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext} + \sigma_{int} \cdot \langle E_{int}^2 \rangle_{skin} \cdot S_{int} \cdot \delta_{int}. \quad (2.47)$$

Було проведено експеримент з фіксованою щільністю електромагнітного поля,

в результаті співвідношення (2.47) отримали вирази (2.48) і (2.49) для значень P_{ext} та P_{int} :

$$P_{ext} \approx S_{ext} \delta_{ext} = \delta_{ext}^{3-d_{S_{ext}}}, \quad (2.48)$$

$$P_{int} \approx S_{int} \delta_{int} = \delta_{int}^{3-d_{S_{int}}}. \quad (2.49)$$

Зазначимо, що рівність у виразах (2.48) та (2.49), впливає із співвідношення (2.13) та (2.15).

Використовуючи співвідношення (2.1), перетворимо (2.48) і (2.49) до виду (2.50) та (2.51):

$$P_{ext} = \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{S_{ext}}}{2}}}, \quad (2.50)$$

$$P_{int} = \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{S_{int}}}{2}}}. \quad (2.51)$$

При $d_{S_{ext}} \cong d_{S_{int}} \cong 2$, ці співвідношення відтворюють стандартне значення загальної енергії $P_{\Sigma} = 1/\sqrt{\omega}$, яка розсіюється речовиною матеріалу оболонки порожнистого циліндра.

Необхідно відзначити, що із співвідношення (2.48) і (2.49), слідує залежності для зовнішнього $V_{ext} = \delta_{ext}^{3-d_{S_{ext}}}$ та внутрішнього $V_{int} = \delta_{int}^{3-d_{S_{int}}}$ об'єму структури матеріалу, які при зміні характеристичної довжини порожнистого циліндра, відтворюють величини фрактальних розмірностей на зовнішній та внутрішній поверхні відповідно до виразів (2.13) та (2.15).

Виконавши експеримент із проходженням електричного струму, отримаємо для

значень E_{ext}^2 и E_{int}^2 наступні вирази (2.52) та (2.53):

$$\langle E_{ext}^2 \rangle_{skin} = V_{ext}^2 / (h_f^{ext})^2 \quad (2.52)$$

$$\langle E_{int}^2 \rangle_{skin} = V_{int}^2 / (h_f^{int})^2 \quad (2.53)$$

Тоді, з урахуванням співвідношень (2.45) та (2.46), маємо:

$$P_{ext} = \frac{\sigma_{ext} \cdot V_{ext}^2 \cdot S_{ext} \cdot \delta_{ext}}{(h_f^{ext})^2} \quad (2.54)$$

$$P_{int} = \frac{\sigma_{int} \cdot V_{int}^2 \cdot S_{int} \cdot \delta_{int}}{(h_f^{int})^2} \quad (2.55)$$

Порівнюючи співвідношення (2.54) та (2.55) з формулою $P=V^2/R$ (де R – електричний опір), отримуємо вирази (2.56) та (2.57) для визначення зовнішнього та внутрішнього електричного опору провідника:

$$R_{ext} = \frac{h_f^{ext2}}{\sigma_{ext} \cdot S_f^{ext} \cdot \delta_{ext}} \quad (2.56)$$

$$R_{int} = \frac{h_f^{int2}}{\sigma_{int} \cdot S_f^{int} \cdot \delta_{int}} \quad (2.57)$$

Зі співвідношень (2.5 – 2.16), знаходимо значення зовнішнього R_{ext} (2.58) та внутрішнього R_{int} електричного опору (2.59), відповідно до виразів (2.56) и (2.57):

$$R_{ext} \sim \frac{\delta_{ext}^{d_{S_f^{ext}}-2d_{h_f^{ext}}-1}}{\sigma_{ext}} \quad (2.58)$$

$$R_{int} \sim \frac{\delta_{int}^{d_{S_f^{int}} - 2d_{h_f^{int}} - 1}}{\sigma_{int}} \quad (2.59)$$

або з урахуванням співвідношення (2.1), отримуємо значення зовнішнього R_{ext} (2.60) та внутрішнього R_{int} (2.61) електричного опору залежно від прикладеної частоти ω , у відповідність до виразів (2.58) и (2.59):

$$R_{ext} \approx \omega^{\frac{1+2d_{h_f^{ext}} - d_{S_f^{ext}}}{2}} \quad (2.60)$$

$$R_{int} \approx \omega^{\frac{1+2d_{h_f^{int}} - d_{S_f^{int}}}{2}} \quad (2.61)$$

При $d_{S_f^{ext}} = d_{S_f^{int}} = 2$ та $d_{h_f^{ext}} = d_{h_f^{int}} = 1$ це співвідношення переходить у стандартне $R \approx \sqrt{\omega}$.

Резюмуючи і наносячи експериментальні дані на графіки в координатах $(\ln P_{ext}, \ln \omega; \ln P_{int}, \ln \omega)$ та $(\ln R_{ext}, \ln \omega; \ln R_{int}, \ln \omega)$, отримуємо прямі з кутовими коефіцієнтами: $(d_s - 3)/2$ и $(1 + 2d_h - d_s)$.

Це дозволяє безпосередньо виміряти d_s та d_h (тобто: $d_{S_f^{ext}}, d_{S_f^{int}}, d_{h_f^{ext}}, d_{h_f^{int}}$).

У згаданому окремому випадку, а саме при $d_{S_f} = d_{h_f} + d_{\ell_f}$, із співвідношень (2.50), (2.51), (2.58), (2.59) отримуємо виразия (2.62 – 2.65):

$$P_{ext} \approx \frac{1}{\omega^{\frac{3-d_{h_f^{ext}} - d_{\ell_f^{ext}}}{2}}} \quad (2.62)$$

$$P_{int} \approx \frac{1}{\omega \frac{3-d_{h_f^{int}}-d_{\ell_f^{int}}}{2}} \quad (2.63)$$

$$R_{ext} \approx \omega \frac{1+d_{h_f^{ext}}-d_{\ell_f^{ext}}}{2} \quad (2.64)$$

$$R_{int} \approx \omega \frac{1+d_{h_f^{int}}-d_{\ell_f^{int}}}{2} \quad (2.65)$$

В іншому окремому випадку, а саме при $d_h = d_\ell = d_S - 1$, із співвідношення (2.50), (2.51), (2.58), (2.59), значення величин P_{ext} , P_{int} , R_{ext} , R_{int} , визначається виразами (2.66 – 2.69) відповідно:

$$P_{ext} \approx \frac{1}{\omega \frac{2-d_{h_f^{ext}}}{2}} \quad (2.66)$$

$$P_{int} \approx \frac{1}{\omega \frac{2-d_{h_f^{int}}}{2}} \quad (2.67)$$

$$R_{ext} \approx \omega \frac{d_{h_f^{ext}}}{2} \quad (2.68)$$

$$R_{int} \approx \omega \frac{d_{h_f^{int}}}{2} \quad (2.69)$$

У цьому випадку один експеримент, наприклад, вимірювання $R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$, як функції від частоти ω дозволяє визначити фрактальні розмірності довжин $d_{h_f^{ext}}$ на

зовнішній та d_{hf}^{int} на внутрішній поверхні порожнистого циліндра.

2.5 Розробка критерію оцінки часу формування та зростання наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки тепловідляючого елемента

При дослідженні фізичних процесів на різних поверхнях (наприклад; зовнішня та внутрішня поверхня матеріалу оболонки тепловідляючого елемента тепловідляючої збірки ядерного реактора атомної електростанції), при виникненні на них ушкоджувальних дефектів, необхідно проводити якісну та 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 та макротріщинами, які у подальшому утворюють наскрізні тріщини.

Як відомо [60 – 76], такі дисипативні структури, мають властивості масштабованості, інваріантності і фрактальності, а отже, можуть характеризуватися кількісною величиною – фрактальною розмірністю.

Крім того, у сучасних методиках розрахунку оцінки критеріїв стану поверхні, як правило вводяться обмеження та припущення, щодо геометричних прирощень, що призводить до наближених і неточних характеристик у використовуваних системах і пристроях, а, отже, до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації (181, 182).

Тому, постає питання, щодо застосування та розвитку сучасних підходів з вдосконалення методів оцінювання критеріїв стану поверхні матеріалу з ушкодженою поверхнею, на основі застосування апарата фрактально-кластерної геометрії (60 – 76).

На теперішній час існує багато методів контролю ушкодження поверхні матеріалу. До них відносяться методи руйнівного та не руйнівного контролю [125, 126, 157, 158, 193 – 195, 223 – 225, 231 – 232, 245]: капілярні, радіографічні, радіохвильові, маспектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні,

вихорострумової дефектоскопії та ін.

Однак даним методам властиві характерні недоліки [182, 245]:

- прийняті обмеження та припущення з усереднення геометричних характеристик поверхні матеріалу;

- при накопичення ушкоджень поверхні, враховується вплив тільки послідовності сукупностей умов при впливі зовнішніх ушкоджувальних дефектів;

- у якості основного фізичного процесу накопичення ушкоджень, як правило, розглядається процес повзучості матеріалу, без врахування структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації елементів.

- розрахунок ушкодження оболонки, розраховується по граничних умовах, тільки для найнапруженого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті на поверхні матеріалу, що вносить значні усереднення та похибки в розрахунки. Таким чином, аналіз показав, що недостатньо повно розроблені методи контролю і оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, що вимагає їхнього вдосконалення, для визначення критерію якісної та кількісної оцінки структурно-фазового стану в повному об'ємі структури матеріалу.

Моделювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються на поверхні різних матеріалів (сплави металів та ін.), традиційними методами, представляється дуже складним і практично неможливим завданням.

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

Розглянемо теоретичні основи, застосування фрактальної теорії, для опису процесів, що протікають в об'ємі структури матеріалу з ушкоджувальними дефектами реальної поверхні. При фізико-хімічних процесах, що протікають на поверхнях матеріалу, відбуваються реакції зі взаємодії зовнішніх факторів (наприклад, у вигляді різних інертних газів та ін.) з поверхнею.

У результаті такого процесу, в об'ємній структурі матеріалу, утворяться

мікроскопічні локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини (рис. 2.3).

Згідно фрактально-кластерної теорії [60 – 76], 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.

З цього випливає, що об'єм структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, можна представити, як кластер-кластерну агрегацію порового простору, що складається із кластерних агрегацій мікропор і макротріщин (рис. 2.3).

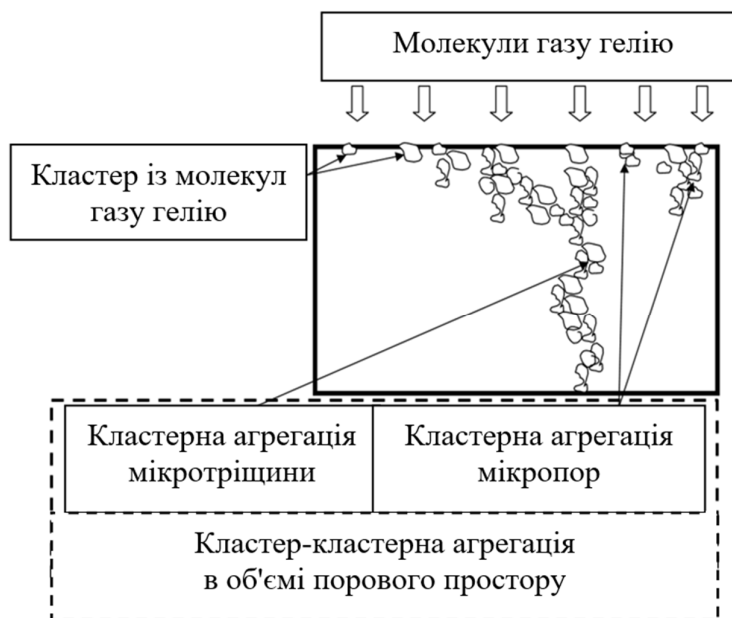


Рис. 2.3. Процес утворення кластер-кластерної агрегації в об'ємі структури матеріалу з ушкодженою поверхнею

Таким чином, для оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, у роботі запропоновано, в якості критерію 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. 2.3).

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 відбуваються початкові структурно – геометричні розподіли структурно утворюючих елементів – кластерів.

Необхідно відзначити, що об'ємна структура кластер-кластерної агрегації, має специфічні фрактальні властивості [245], та характеризується і оцінюється ступенем заповнення об'ємом простору кластер-кластерної агрегації з використанням фрактальної розмірності.

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), 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 АЕС.

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

Проведення оцінки часу утворення наскрізної тріщини в оболонці ТВЕЛ, з нанодисперсною об'ємною фрактальною 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 який 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. 2.3).

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 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 дорівнює середній щільності матеріалу в об'ємі, що у процесі формування кластера не змінюється. Тим самим кластери поєднуються в один кластер нескінченних розмірів (рис. 2.3).

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. 2.3).

Як видно, з (рис. 2.3), 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 виразів припустимо, що частки сферичні і мають той самий розмір, крім того, будемо вважати, що зіткнення часток або кластерів призводить до їх об'єднання.

Варто враховувати дифузійний рух часток у середовищі, 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.

Число часток у кластері задовольняє виразу (2.70):

$$dn/dt = v_0 + v_1, \quad (2.70)$$

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

D – 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;

Нехай радіус кластера R і число часток у ньому n відповідно зв'язані співвідношенням (2.71):

$$n = (R / r_0)^{d_f}, \quad (2.71)$$

де n – число часток у кластері;

R – радіус кластера;

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 (2.72):

$$v_0 = k_0 N n^{1/d_f}, \quad (2.72)$$

де v_0 – частота прилипання до кластера часток, що роблять броунівський рух;

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

N – число часток в одиниці об'єму;

n – число часток у кластері.

Частота захвату часток падаючим кластером, визначається по формулі (2.73):

$$v_1 = \pi R^2 v N, \quad (2.73)$$

де ν_1 – частота захвату кластером часток;

$$\nu = \frac{2\rho r_0^2 g}{9\eta} - \text{швидкість падіння кластера під дією сили ваги};$$

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

При цьому, вводиться умова, що пори в кластері зайняті матеріалом середовища, у якому він росте. Тоді з урахуванням цього, перетворимо вираз (2.73), до наступного виду:

$$\nu_1 = k_1 N n^{\frac{d_f+1}{d_f}} \quad (2.74)$$

де $k_1 = \frac{2\pi\rho g r_0^4}{9\eta}$ – коефіцієнт швидкість падіння кластера під дією сили ваги.

Підставляючи значення виражень (2.73) і (2.74) у рівняння (2.70), отримаємо аналітичний вираз (2.75) для часу росту кластера наскрізної тріщини:

$$t = \frac{1}{N} \int \frac{dn}{k_0 n^{1/d_f} + k_1 n^{1+1/d_f}}. \quad (2.75)$$

Враховуючи, що $k_0 > k_1$, одержуємо, що цей інтеграл в основному сходиться при $n \gg k_0/k_1 > 1$, так що в якості нижньої й верхньої меж в (2.75) 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 ушкодженою поверхнею (2.76):

$$t = \frac{\pi}{Nk_0^{1/d_f} k_1^{1-1/d_f} \sin\left(\frac{n}{d_f}\right)}. \quad (2.76)$$

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 ушкодженою поверхнею (2.77):

$$t \approx \frac{\tilde{n}_0}{N_0 k_0 a_0} \approx \frac{1}{N_0 k_0 a_0} \left(\frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right)^{d_f / (3d_f)}, \quad (2.77)$$

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

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

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

Розглянуті аналітичні вирази (2.76) і (2.77), 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 ушкодженою поверхнею.

Варто відзначити, 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 об'єму, 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 та внутрішньої поверхні матеріалу, що, за результатами даних отриманих при проведенні експерименту із використанням скін-ефекту, визначається виразом (2.78):

$$d_f^\Sigma = 2 \ln \frac{R_{el}}{\omega} \quad (2.78)$$

де $R_{el} = R_{ext} + R_{int}$ – загальний електричний опір провідячого матеріалу;

R_{ext} – електричний опір на зовнішній поверхні провідячого матеріалу;

R_{int} – електричний опір на внутрішній поверхні провідячого матеріалу;

ω – резонансна частота коливань часток, що дозволяє записати співвідношення (8) у вигляді виразу (2.79):

$$t \approx \frac{n_0^{\frac{3}{2} - \ln \frac{\omega}{R_{el}}}}{N_0 k_0} \quad (2.79)$$

У таблиці 2.1, представлені дані обчислювального експерименту, розраховані по формулі (2.77), для значень часу формування кластера і відповідні йому значення радіуса часток r і первісної щільності ρ матеріалу.

На (рис. 2.4), показані залежності часу росту кластера t від радіуса часток r і первісної щільності ρ структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Із графіків (рис. 2.4), випливає, що чим більше радіус частки r і більше первісна щільність ρ матеріалу, тим швидше формується й росте кластер наскрізної тріщини у фрактальній структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Таблиця 2.1

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

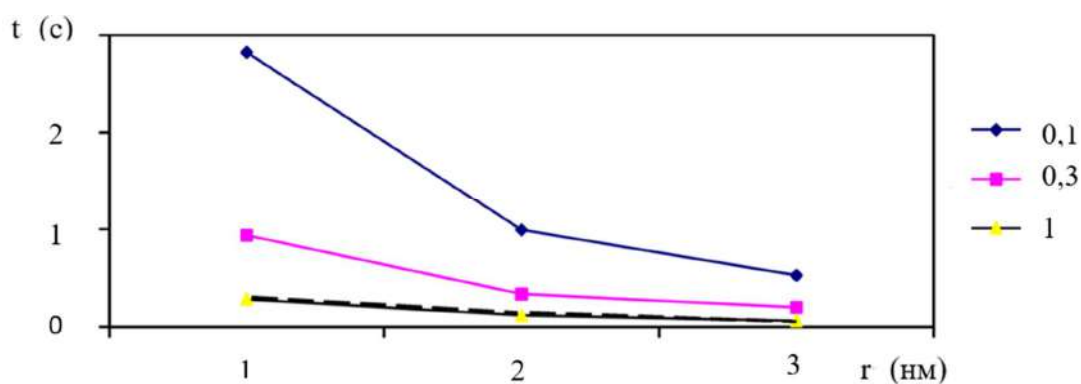


Рис. 2.4. Залежність часу росту кластера t від радіуса часток r та первісної щільності ρ матеріалу

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 ушкодженої поверхні матеріалу в залежності від концентрації часток (молекул гелію) у кластері наскрізної тріщини, і може коливатися в межах від мілісекунд до одиниць секунд, що підтверджується результатами обчислювального експерименту.

Таким чином, проаналізовані підходи з оцінювання критерію стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею та запропоновано, в якості критерію оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, використати час формування та росту кластера наскрізної тріщини в об'ємі фрактальної структури матеріалу. Визначено, що в якості кількісної величини, для оцінки стану структури матеріалу, обрана загальна фрактальна розмірність.

Встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах, залежить від концентрації часток (молекул гелію) у кластері та коливається в межах від мільйонів секунд до одиниць секунд.

Висновки до другого розділу

Запропоновано новий підхід для вивчення структурно-фазових змін у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, викликаних ушкоджуючими дефектами, на основі апарату фрактальної геометрії, який враховує фрактальні збільшення геометричних параметрів ТВЕЛ.

Показано перевагу використання методу фрактальної геометрії для побудови фрактальних поверхонь оболонки ТВЕЛ перед класичними моделями негладких форм.

Побудовано фізичну модель оболонки ТВЕЛ у вигляді геометричної фігури порожнистого циліндра, яка дозволяє досліджувати фрактальну структуру оболонки та визначити реальну площу поверхні оболонки по всій висоті ТВЕЛ, яка знаходиться в ступеневій залежності від фрактальної розмірності.

Удосконалено аналітичні вирази моделі ушкодженості та моделі деформації оболонки ТВЕЛ, що дозволяє при проведенні післяреакторних досліджень підвищити безпеку експлуатації реактора на швидких нейтронах за рахунок:

- виявлення розгерметизації ТВЕЛ на більш ранній стадії ушкодження структури матеріалу оболонки;
- ефективного визначення моменту перевищення нормативних меж з розгерметизації ТВЕЛ;
- підвищення точності локалізації дефектних ТВЕЛ.

Підтверджено адекватність отриманої вдосконаленої моделі ушкодження оболонки, на основі проведення обчислювального експерименту на фізичній моделі оболонки з використанням скін-ефекту, який підтвердив відповідними розрахунками, результати теоретичних досліджень.

Визначено, що в якості кількісної величини, для оцінки стану структури матеріалу, обрано загальну фрактальну розмірність.

Теоретично обґрунтовано вибір, використання параметра фрактальної розмірності, як ефективного критерію оцінки герметичності та розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Проаналізовано підходи до оцінювання критерію стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею.

Запропоновано, в якості критерію оцінки стану структури матеріалу з ушкодженою поверхнею, використовувати час формування та зростання кластера наскрізної тріщини в об'ємі фрактальної структури матеріалу.

Встановлено, що час утворення кластер-кластерних агрегацій у фрактальних структурах залежить від концентрації частинок (молекул гелію) у кластері і коливається в межах від мілісекунд до одиниць секунд.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТВЕЛ

У розділі 3 показано проведення та обробка результатів експериментальних досліджень на фізичній моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту.

Показано, що у проведеному експерименті з проходженням електричного струму та фіксованою щільністю електромагнітного випромінювання в порожнині циліндроподібної трубки просторовий розподіл електромагнітного струму еволюціонує з частотою ω . Саме ця еволюція дозволяє полю фіксувати фрактальну розмірність системи з використанням скін-ефекту.

В результаті проведеного експерименту, показано, що реальні фрактальні збільшення геометричних параметрів (площа, висота) ТВЕЛ, знаходяться в ступеневій залежності від величини фрактальної розмірності, і відповідають її певному значенню на аксіальних сегментах пошкодженої поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти електричного опору (потужності) під час використання скін-ефекту.

3.1 Порядок проведення експериментальних досліджень на фізичній моделі оболонки ТВЕЛ у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту

Для проведення експериментальних досліджень, в якості фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, була обрана циліндроподібна залізна трубка (рис. 3.1) з наступними геометричними параметрами: довжина – 3837 мм; зовнішній діаметр – 9,15 мм; внутрішній діаметр – 7,73 мм; товщина стінки – 0,69 мм.

По висоті трубки, на 10 ділянках поверхні оболонки, за допомогою методу лазерного свердління, були нанесені ушкоджуючі дефекти різного розміру від 3 мкм (розмір мікропори) до 50 мкм (розмір макротріщини), а також дефект типу наскрізна

тріщина розміром більше 50 мкм (55, 70, 80, 100, 120 мкм).



Рис 3.1. Вигляд експериментального зразка трубки – імітатора фізичної моделі ТВЕЛ з різними ушкоджуючими дефектами на поверхні оболонки

Для проведення вимірювань із застосуванням скін-ефекту було розроблено лабораторний макет експериментальної установки, що дозволяє змоделювати скін-ефект.

До складу лабораторної установки входить наступне обладнання та прилади (рис. 3.2): генератор сигналів функціональний ГСФ-2; осцилограф–мультиметр С1-112А; набір алюмінієвих та залізних трубок; магазин ємностей; сполучні дроти. Генератор електричних коливань, згідно з (рис. 3.2) включає: L – соленоїд, С1 і С2 – конденсатори однакової ємності (перебувають у магазині ємностей), DA1 – операційний підсилювач, R1 і R2 – резистори.

При подачі живлення на мікросхему на виводах соленоїда з'являється гармонійний сигнал, а на виході підсилювача точка А на (рис. 3.2) – сигнал, близький до прямокутного. За наявності цих сигналів за допомогою осцилографа вимірюється частота сигналу на виході підсилювача.

Якщо у соленоїд вставити досліджуваний зразок трубки – фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, то індуктивність коливального контуру зміниться. За відповідною зміною частоти визначається електричний опір та потужність провідника – зразка трубки фізичної моделі оболонки ТВЕЛ, а потім обробляється у обчислювальному пристрої за допомогою обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів (рис. 3.2).

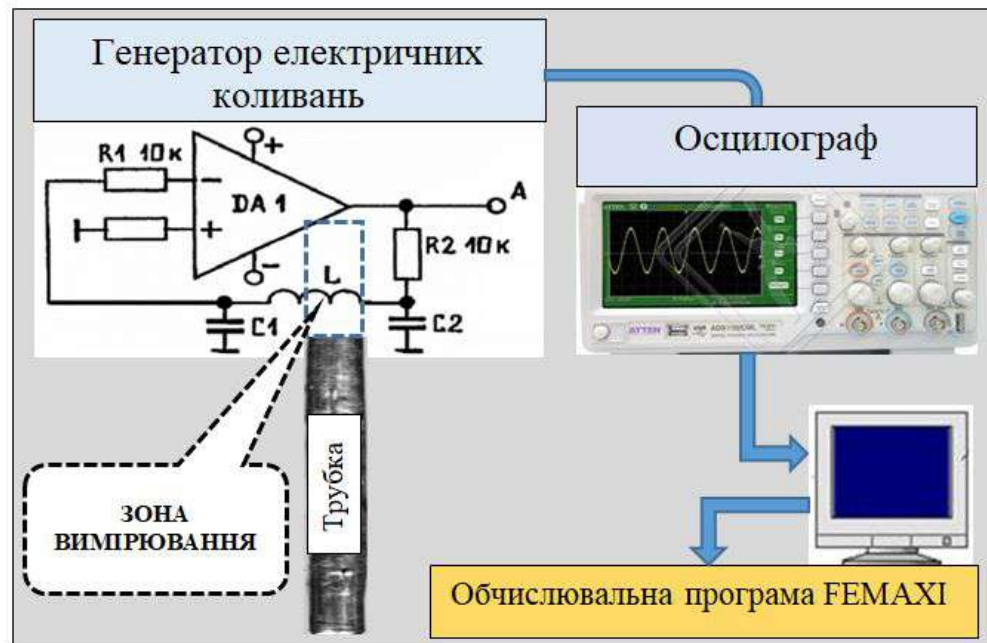


Рис. 3.2. Структурна схема складу обладнання лабораторної установки для проведення експерименту з використанням скін-ефекту

Для вимірювання, залежності величини фрактальної розмірності від прикладеної частоти та електричного опору (потужності) проводилися такі етапи експерименту (рис. 3.3):

Визначення місцезнаходження ушкоджуючого дефекту на поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ на вибраних аксіальних сегментах №1÷10:

- визначення залежності величини електричного опору (потужності) від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- заповнення таблиці з даними результату експерименту визначення залежності величини електричного опору (потужності) від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- побудова графіків за даними таблиці за результатами експерименту визначення залежності величини електричного опору від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

- побудова графіків за даними таблиці за результатами експерименту визначення залежності величини електричної потужності від прикладеної частоти для кожного аксіального сегмента №1÷10;

– визначення величини фрактальної розмірності шляхом визначення тангенса кута нахилу графіка залежності R/R_0 від ω/ω_0 ;

– визначення величини фрактальної розмірності шляхом визначення тангенса кута нахилу графіка залежності P/P_0 від ω/ω_0 ;

Якщо при визначенні величини фрактальної розмірності вона перевищує топологічну розмірність, тобто $d_f > 1$ (для R/R_0 від ω/ω_0) або $d_f > 2$ (для P/P_0 від ω/ω_0), тоді можна стверджувати, що на даному аксіальному сегменті зразка ТВЕЛ, має місце ушкоджуючий дефект на поверхні оболонки зразка ТВЕЛ.

Для виконання етапів експерименту було розроблено наступну послідовність ходу експерименту, як показано на (рис. 3.3).

Розглянемо послідовність виконання етапів експерименту. Для проведення експерименту модель ТВЕЛ у вигляді сталеві трубки довжиною 3880 мм була розділена на 10 аксіальних сегментів, в центральній точці кожного з них, на поверхні оболонки були задані штучно створені, різні типи дефектів у вигляді вм'ятин, опуклостей, подряпин, сколів, пор, тріщин та розмірів від $3 \div 50$ мкм, а також в оболонці, за допомогою лазерного променя, була зроблена наскрізна тріщина розміром понад 50 мкм.

Як було визначено в ході теоретичних досліджень, кожному розміру дефекту відповідає певне значення фрактальної розмірності, для якої на відміну від геометричної (топологічної) розмірності ($d_T = 2$) завжди дотримується нерівність: $d_f \neq 2$.

Тоді для визначення місцезнаходження дефекту визначимо всі аксіальні сегменти, в яких $d_f \neq 2$.

Для цього, за допомогою лабораторної установки, показаної на (рис. 3.2), яка імітує (моделює) скін-ефект, було досліджено кожен аксіальний сегмент зразка у вигляді порожнього циліндра та отримано дані залежності електричного опору (потужності) від прикладеної частоти на кожному аксіальному сегменті, які занесені до таблиць 3.1 та 3.2.

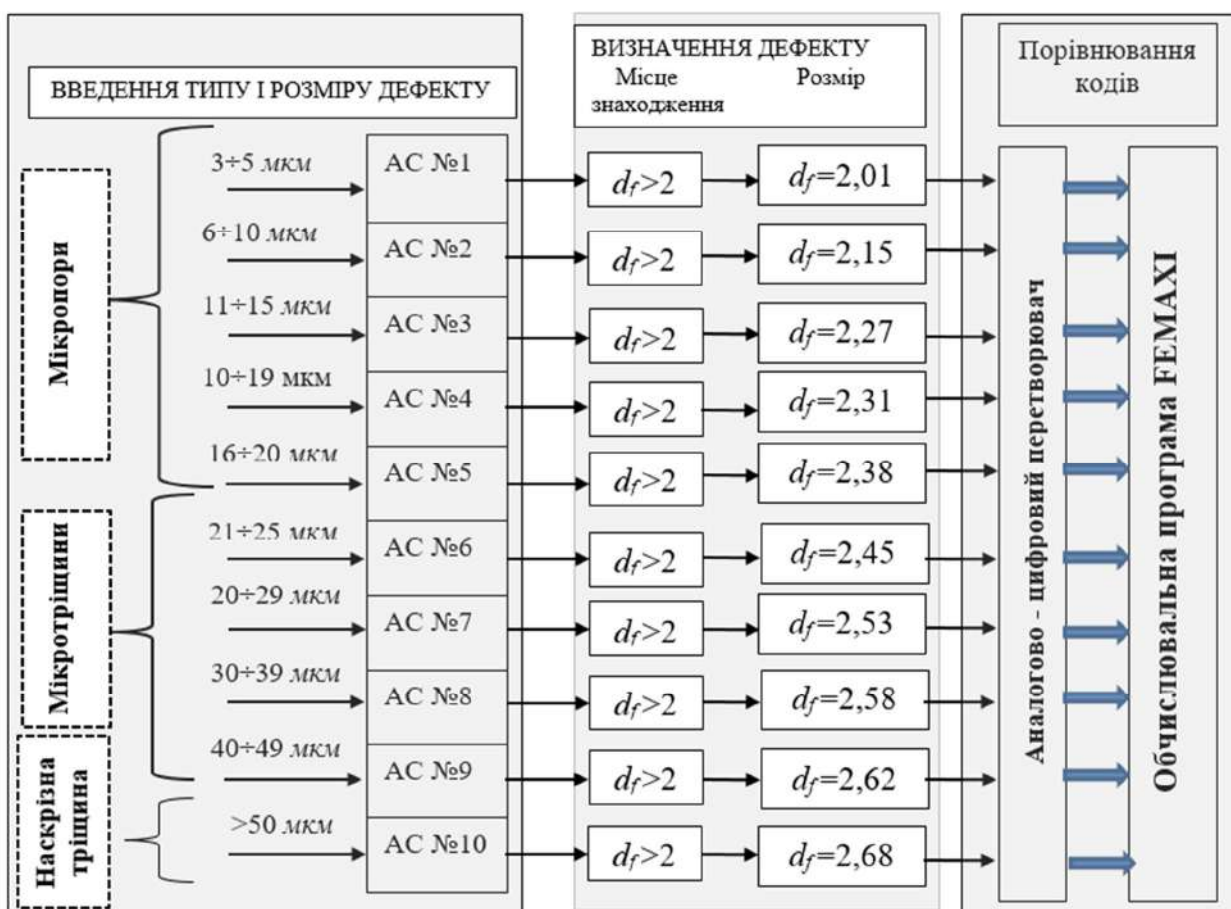


Рис. 3.3. Послідовність виконання етапів експерименту

За експериментальними даними з таблиці 3.1 та 3.2, були складені графіки залежності електричного опору (потужності) від прикладеної частоти на кожному аксіальному сегменті.

Далі було визначено значення величин фрактальної розмірності на кожному аксіальному сегменті по довжині ТВЕЛ шляхом вимірювання кутового коефіцієнта (тангенс кута нахилу) на графіку $\ln R/R_0$ та $\ln P/P_0$, як функції від $\ln \omega/\omega_0$.

Таким чином, по тангенсу кута нахилу, отримали значення величин фрактальної розмірності на кожному аксіальному сегменті №1÷10 для залежності $\ln R/R_0$ як функції від $\ln \omega/\omega_0$ (графік 1, рис. 3.4) і для залежності $\ln P/P_0$, як функції від $\ln \omega/\omega_0$ (графік 1, рис. 3.5).

Для тих аксіальних сегментів зразка порожнистого циліндра, де $d_f \neq 2$ означає наявність на поверхні оболонки ушкоджуючого дефекту.

Для перевірки адекватності отриманих результатів у ході експериментальних досліджень було використано відому обчислювальну програму FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів (рис. 3.3).

Проведено порівняння значень фрактальної розмірності $d_f > 2$, отриманих під час експерименту з базою даних обчислювальної програми FEMAXI V

Важливо, що висновок, отриманий шляхом розрахунків за програмою FEMAXI V, підтвердив адекватність результатів експерименту. Розбіжність у результатах порівняння становила трохи більше 0,5%. Це практичне застосування. Далі, для визначення типу та розміру дефекту, за допомогою відомої обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259], яка містить коди еталонних дефектів, проводиться порівняння зі значеннями фрактальної розмірності $d_f > 2$, які отримані в ході експерименту.

В результаті порівняння розрахунків та вимірювань, було виявлено місце розташування та розміри дефектів на кожному аксіальному сегменті за довжиною експериментального зразка, задані як початкові умови для проведення експерименту та отримані в результаті обчислень за допомогою обчислювальної програми FEMAXI V [258 – 259].

У джерелах [258 – 259] вказана математична модель, закладена в ПЗ FEMAXI, яка призначена для аналізу зміни властивостей твела реактора типу ВВЕР–1000 в режимі змінного навантаження, оскільки використовує метод кінцевих елементів, що дозволяє коректно оцінювати зміни в стані ТВЕЛ не лише в стаціонарних, але і в перехідних режимах, а також застосовує алгоритм спільного рішення рівнянь теплопровідності та механічної деформації для обчислення еквівалентних деформації повзучості та напруги залежно від режиму навантаження. Синтез математичної моделі, закладеної в ПЗ FEMAXI, і моделі оцінки довговічності оболонки твела на основі енергетичного варіанту теорії повзучості, дозволив уперше описати зміну властивостей ТВЕЛ РУ з ВВЕР–1000 залежно від режиму змінного вантаження. При використанні запропоновану математичну модель зміни властивостей твела РУ з ВВЕР–1000 в різних експлуатаційних режимах, необхідно виконати оцінку довговічності оболонки твела в змінному режимі вантаження та провести аналіз отриманих результатів.

Результати експерименту підтвердили наявність ушкоджуючого дефекту типу наскрізної тріщини на аксіальному сегменті № 10 з розміром більше 50 мкм, якому відповідає фрактальна розмірність $d_f = 2,68$. Важливо, що висновок, отриманий шляхом розрахунків за програмою FEMAXI V, підтвердив результат експерименту.

3.2 Дослідження та обговорення результатів експериментальних досліджень зразка трубки – імітатора фізичної моделі ТВЕЛ з різними ушкоджуючими дефектами на поверхні оболонки

У ході експерименту було розглянуто якісну картину просторового розподілу електромагнітного поля ззовні та всередині структури матеріалу зовнішньої S_f^{ext} та внутрішньої S_f^{int} поверхонь оболонки порожнистого циліндра.

Показано, що в експерименті з фіксованою щільністю електромагнітного випромінювання вона характеризується певною специфікою розподілу величин електричного опору та потужності (R_Σ , P_Σ), при проходженні електричного струму в скін-шарі з певною частотою ω .

При цьому розсіювання енергії на поверхні наночастинок (залежно від частоти супроводжується: ефектами дисипації у зовнішнє середовище; поглинанням P_Σ в порожнині структури (резонансне поглинання енергії)).

Необхідно відзначити, що характер розподілу загального електричного опору R_Σ для фрактальної структури в скін-шарі також залежить від прикладеної частоти ω [252].

На (рис. 3.3), показані графіки залежності повного опору циліндра $R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$ від частоти для різних значень фрактальної розмірності (табл. 3.1) поверхні циліндра в подвійному логарифмічному масштабі.

В ході експерименту було введено припущення, що зовнішня та внутрішня поверхні оболонки ТВЕЛ, мають однакову фрактальну розмірність.

Пряма 1 на графіці (рис. 3.3). відповідає гладкій геометричній поверхні з фрактальною розмірністю $d_{hf} = 1$ і описує класичну залежність $R \propto \sqrt{\omega}$.

Зі збільшенням фрактальної розмірності d_{h_f} , кут нахилу прямих 2, 3, 4, 5 на графіці (рис. 3.3), зростає.

На (рис. 3.4) показані графіки залежності повної виділеної потужності на поверхнях порожнистого циліндра P_Σ від частоти ω , для різних значень фрактальної розмірності d_{S_f} (табл. 3.2) площі поверхні циліндра у подвійному логарифмічному масштабі.

Передбачається, що зовнішня та внутрішня поверхні оболонки ТВЕЛ, мають однакову фрактальну розмірність площі загальної поверхні всього об'єму матеріалу,

що дорівнює $d_{S_f} = \left(d_{S_f^{ext}} + d_{S_f^{int}} \right) / 2$. Кутовий коефіцієнт прямих згідно (41) та (42)

дорівнює $\left(d_{S_f} - 3 \right) / 2 - 3) / 2$.

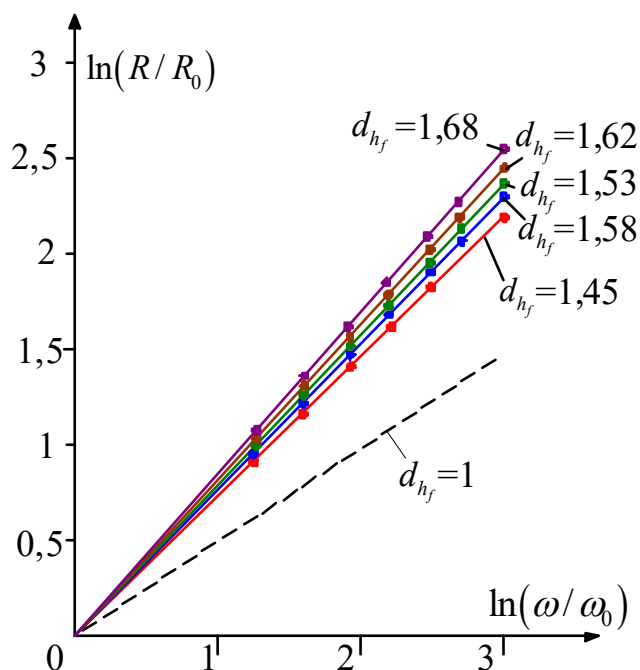


Рис. 3.3. Графіки зміни фрактальної розмірності на площі поверхні порожнистого циліндра в залежності від повного опору ($R_\Sigma = R_{ext} + R_{int}$) та частоти ω

Результати вимірювань фрактальної розмірності на аксіальних сегментах поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти та

електричного опору ($\nu_0 = 0,5$ ГГц)

Таблиця 3.1

Параметри експерименту		Аксіальний сегмент z									
		1		2		3		4		5	
$\frac{\omega}{\omega_0}$	$\ln \frac{\omega}{\omega_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$	$\frac{R}{R_0}$	$\ln \frac{R}{R_0}$
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
3	1,10	2,22	0,80	2,32	0,84	2,38	0,87	2,44	0,89	2,51	0,92
5	1,61	3,22	1,17	3,42	1,23	3,56	1,27	3,67	1,30	3,86	1,35
7	1,95	4,10	1,41	4,44	1,49	4,66	1,54	4,85	1,58	5,16	1,64
10	2,30	5,31	1,67	5,81	1,76	6,17	1,82	6,42	1,86	6,89	1,93
15	2,71	7,09	1,96	7,92	2,07	8,50	2,14	9,03	2,20	9,78	2,28
20	3,00	8,84	2,18	9,97	2,30	10,70	2,37	11,36	2,43	12,43	2,52
Фрактальна розмірність		$d_{h_f} = 1,45$		$d_{h_f} = 1,53$		$d_{h_f} = 1,58$		$d_{h_f} = 1,62$		$d_{h_f} = 1,68$	

Пряма 1 на графіку (рис. 3.4) відповідає гладкій геометричній поверхні з розмірністю $d_{S_f} = 2$ та описує класичну залежність $P \sim 1/\sqrt{\omega}$. Зі збільшенням фрактальної розмірності, кут нахилу прямих (2, 3, 4, 5), як показано на графіку (рис. 3.4), зменшується.

Таким чином, за графіками на (рис. 3.3 та 3.4), які побудовані за експериментальними даними (табл. 3.1 та 3.2), можна спостерігати динаміку процесу ушкодження поверхні оболонки по всій довжині ТВЕЛ, у зонах вимірюваних аксіальних сегментів ($z_1 \div z_5$). Отримано, що при максимальному подовженні ТВЕЛ відбувається зміна величини фрактальної розмірності d_f від 1,45 до 1,68.

Як видно із графіка (рис. 3.5), максимальна ступінь ушкодження зовнішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, спостерігається в активному сегменті z_5 по висоті ТВЕЛ від 2,1 до 2,6 м, при цьому величина фрактальної розмірності $d_f = 1,68$.

Отже, в якості критерію розгерметизації для даного ТВЕЛ, при контролі герметичності оболонки, повинна виконуватися така умова:

- при $1,45 < d_f \leq 1,66$ – оболонка ТВЕЛ ушкоджена, але герметична;
- при $d_f \geq 1,68$ – оболонка ТВЕЛ розгерметизована.

Також отримано, що при максимальному подовженні ТВЕЛ відбувається зміна

величини фрактальної розмірності d_{S_f} площі внутрішньої поверхні від 2,45 до 2,68.

Як видно із графіка (рис. 3.6), максимальна ступінь ушкодження внутрішньої поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, спостерігається в активному сегменті z_5 по висоті ТВЕЛ від 2,1 до 2,6 м, величина фрактальної площі внутрішньої поверхні $d_{S_f} = 2,68$.

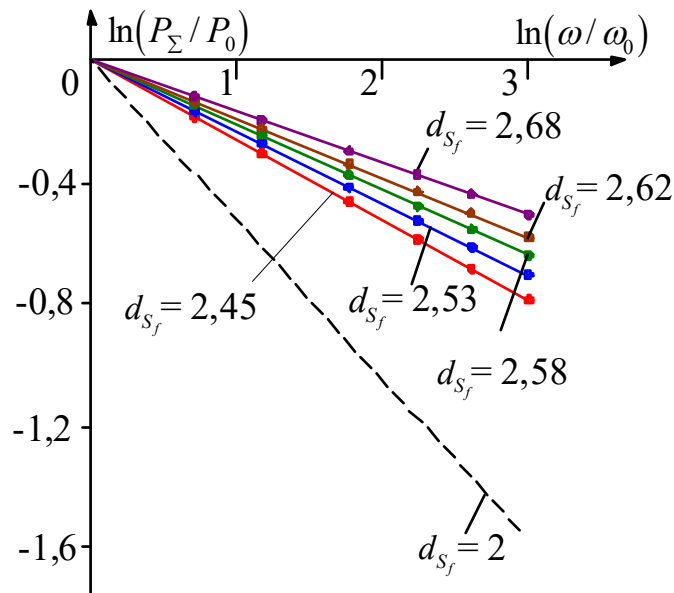


Рис. 3.4 Графіки зміни фрактальної розмірності на площі поверхні порожнистого циліндра в залежності від повної виділяємої потужності

$$(P_{\Sigma} = P_{ext} + P_{int}) \text{ та частоти } \omega$$

Результати вимірювань фрактальної розмірності на аксіальних сегментах поверхні оболонки по висоті ТВЕЛ, в залежності від прикладеної частоти та потужності (початкова частота: $\nu_0 = 0,5$ ГГц)

Таблиця 3.2

Параметри експерименту		Аксіальний сегмент z									
		1		2		3		4		5	
$\frac{\omega}{\omega_0}$	$\ln \frac{\omega}{\omega_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$	$\frac{P}{P_0}$	$\ln \frac{P}{P_0}$
1	0,00	1,00	-0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
3	-1,10	0,73	-0,30	0,77	-0,25	0,79	-0,23	0,81	-0,21	0,48	-0,17
5	-1,61	0,64	-0,44	0,68	-0,37	0,71	-0,33	0,73	-0,31	0,34	-0,25
7	-1,95	0,58	-0,53	0,63	-0,45	0,66	-0,41	0,69	-0,37	0,27	-0,31
10	-2,30	0,53	-0,63	0,58	-0,54	0,61	-0,48	0,64	-0,43	0,21	0,36
15	-2,71	0,47	-0,74	0,52	-0,63	0,56	-0,56	0,59	-0,51	0,16	0,43
20	-3,00	0,43	-0,82	0,49	-0,70	0,53	-0,63	0,56	-0,57	0,13	0,48
Фрактальна розмірність		$d_{S_f} = 2,45$		$d_{S_f} = 2,53$		$d_{S_f} = 2,58$		$d_{S_f} = 2,62$		$d_{S_f} = 2,68$	

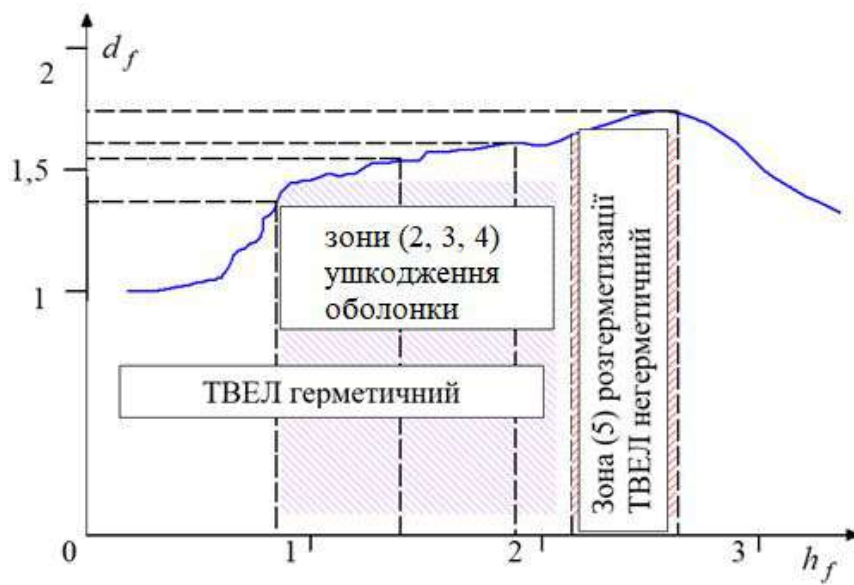


Рис. 3.5. Зміна величини фрактальної розмірності зовнішньої площі ушкодженої поверхні оболонки по всій довжині (висоті) ТВЕЛ

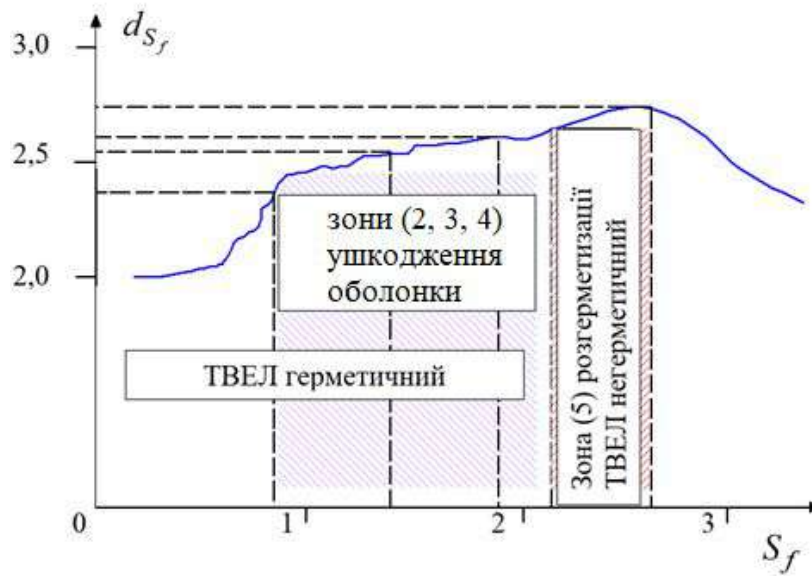


Рис. 3.6. Зміна величини фрактальної розмірності площі ушкодженої поверхні оболонки по всій довжині (висоті) ТВЕЛ

Отже, в якості критерія розгерметизації для даного ТВЕЛ, при контролі герметичності оболонки, повинна виконуватися така умова:

- при $2,45 < d_f \leq 2,66$ – оболонка ТВЕЛ ушкоджена, але герметична;
- при $d_f \geq 2,68$ – оболонка ТВЕЛ розгерметизована.

Висновки до третього розділу

Експериментально підтверджений неруйнівний метод оцінювання якості герметичності оболонки тепловиділяючого елемента для систем контролю герметичності оболонки, який дозволяє визначити місце розташування та розміри дефекту на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки, на основі визначення величини фрактальної розмірності на аксіальних сегментах за висотою тепловиділяючого елемента, шляхом визначення електричного опору та потужності від прикладеної частоти під час використання скін-ефекту

Експериментально обґрунтовано вибір величини фрактальної розмірності, для практичного використання, в якості ефективного критерію оцінки ступеня герметичності (розгерметизації) оболонки тепловиділяючого елемента.

Наведено послідовність вимірювань величини фрактальної розмірності, яка відповідає різним типам дефектів ушкодження за місцезнаходженням та розмірами, на поверхні оболонки по всій висоті тепловиділяючого елемента.

Експериментально отримано значення величини фрактальної розмірності, при яких оболонка тепловиділяючого елемента ушкоджена та деформована, але вважається герметичною, а також значення фрактальної розмірності, при яких однозначно вважається, що оболонка розгерметизована.

Підтверджено адекватність одержаних теоретичних досліджень щодо вдосконалення моделей ушкодженості та деформації оболонки, на основі проведення експерименту на фізичній моделі оболонки тепловиділяючого елемента у вигляді циліндроподібної трубки з використанням скін-ефекту.

РОЗДІЛ 4

**ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ
МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ
ОБОЛОНКИ ТВЕЛ**

4.1 Розробка варіанта структурної схеми вдосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента для застосування фрактального методу

У роботі, для реалізації та застосування фрактального методу контролю, на основі підходів та принципів розроблення методів кваліметрії, як показано в роботах [256-275], було розроблено варіант структурно-функціональної схеми удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, що включає наступні структурні елементи (рис. 4.1):

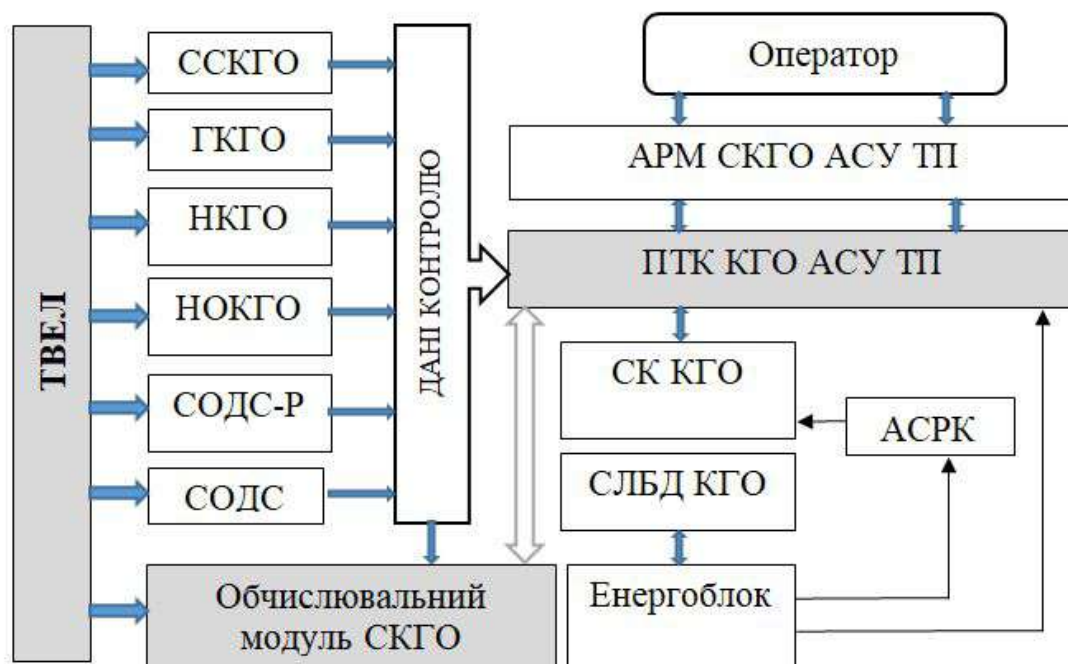


Рис. 4.1. Удосконалена структурно-функціональна система КГО ТВЕЛ

4.2 Розробка алгоритму для обчислювального модуля системи контролю за герметичністю оболонки для поєднання з автоматизованою системою управління технологічними процесами енергоблоку АЕС

У розділі 1, був зроблений аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, який показав, що їх застосування, для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (наприклад, локальні неоднорідності, мікро- і макропори, різноманітні тріщини, осьова рихлість), відрізняється малою ефективністю, являє трудомісткий процес, який вимагає додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ. Крім того, досліджені методи контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, дозволяють візуально виявити тільки грубі зовнішні тріщини, великі шлакові включення, дрібні тріщини і неметалеві включення невидимі під шаром окалини. Виходячи з даних вищевикладених проблем, виникає доцільність розробки і застосування, принципово нових методів контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ з урахуванням сучасних наукових досягнень.

З позиції неруйнівного контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ, перспективним є використання теорії фракталів, фрактально-кластерного аналізу для розробки способів оцінювання якості поверхні оболонки з метою виявлення небажаних структурних змін (дефектів) поверхні і макроструктури матеріалу на всіх стадіях при експлуатації ТВЕЛ. Тому, в роботі запропоновано, для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки при її ушкодженні і руйнуванні, доцільність застосування розрахункового апарату, заснованого на методі теорії фракталів [60 – 74, 172, 179, 180, 192, 210, 211, 222, 236, 239, 253].

В якості основи, запропонованого методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ з використанням теорії фракталів, в роботі запропоновано використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки і кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь заповнення об'єму структури матеріалу оболонки при розгерметизації ТВЕЛ [180, 253].

Для оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, розглянемо опис базового методу фрактально-кластерної теорії (МФКТ). Необхідно розглянути

відмінні риси запропонованого методу МФКТ від існуючих методів контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Це перш за все можливість створення цілком реалізованої автоматизованої системи оперативного виявлення дефектів оболонки на різних стадіях при експлуатації ТВЕЛ, як підсистеми в складі СКГО АСУ ТП енергоблока АЕС. При цьому необхідно розробити і реалізувати алгоритм виконання запропонованого методу МФКТ у складі математичного забезпечення автоматизованої системи оперативного контролю (АСОК) якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Для реалізації даного методу, в роботі розроблено та запропоновано алгоритм автоматизованої системи оперативного контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, блок-схема алгоритму (рис. 4.2) дозволяє:

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

- обробляти дані в режимі реального часу та розпізнавати мікроструктуру (локальні неоднорідності, мікро- і макропори і тріщини, наскрізні тріщини) і на основі цього, визначати координати локального зовнішнього і внутрішнього дефекту в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Алгоритм системи АСОК у складі системи АСУ ТП енергоблоку АЕС включає наступні етапи:

Етап №1: Вибір початкових умов;

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

Етап №3: Попередня обробка даних про структуру оболонки ТВЕЛ;

Етап №4: Визначення координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ, шляхом розрахунку величин фрактальної розмірності на аксіальних ділянках за висотою (довжиною) ТВЕЛ;

Етап №5: Фіксація координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ шляхом відбору величини фрактальної розмірності на аксіальному ділянці за висотою (довжиною) ТВЕЛ, що відповідає дефекту типу наскрізна тріщина;

Етап №6: Порівняння у базі даних, показників фрактальної розмірності