

П.З.Луговий¹, О.П.Шугайло²,
Я.Д.Круглій², Р.І.Москалішин²

ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ТЕПЛОБІМНИХ ТРУБОК ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

¹Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,
вул. Нестерова, 3, 03057, м. Київ, Україна; e-mail: plugovyy@inmtech.kiev.ua
²Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки,
вул. В. Стуса, 35 – 37, 03142, м. Київ, Україна; e-mail: ap_shugaylo@sstc.ua

Abstract. During an operation of the steam generator (SG), through the features of water-chemical and temperature conditions, the pollution of heat exchange tubes (HET) happens and the sludge may be accumulated on their surface. The accumulation of sludge can affect the appearance of different defects, such as thinning of the wall, cracks, pitting, etc, and correspondently on the behavior of HET. In the case when defects coincide with the additional impact of sludge on the tube, formation of additional mass on its surface, limitation of the possibility of free movement, and change their thickness, the stress and strain state of the HET may change significantly. For reliable evaluation of the stress-strain state of HET in places where sludge was accumulated and defects exist, the corresponding investigation is carried out to define their impact on HET. The results of the investigation of cracks affecting the HET structural integrity under accident conditions are presented.

Key words: steam generator, heat exchanger tube, slime, stress-strain state.

Вступ.

На поточний момент атомні електростанції (АЕС) України виробляють понад 50% електроенергії і цей обсяг має постійну тенденцію до зростання. Фактично кожна друга електрична лампочка світить завдяки атомній електричній енергії. У той же час Україна в повній мірі відчула на собі небезпеку від нестачі знань і досвіду використання фізичних процесів, які мають місце при роботі АЕС. І в цьому випадку поглиблення знань про процеси, які відбуваються при експлуатації, є однією з основних задач інженерів і вчених для втілення на практиці відповідних заходів для підвищення безпеки. Парогенератор (ПГ) являє собою складну геометричну конструкцію, до складу якої входять тонкостінні та товстостінні оболонки і оболонки середньої товщини [6]. Теплообмінна трубка (ТОТ) розглядається як оболонка середньої товщини, жорстко закріплена по кінцях в колекторах ПГ і шарнірно оперта по довжині з нерегулярністю геометрії, обумовленої наявністю дефектів двох основних типів – потоншення стінки (втрата металу) і тріщина. Це фактично є бар'єром між чистим «другим» контуром і «брудним» радіоактивним першим контуром. Руйнування ТОТ не допускається, а в разі порушення їх цілісності може виникнути аварійна ситуація (перетік з першого контуру в другий).

Відповідно до рішень Уряду [4] і [5] розроблені і впроваджуються заходи щодо забезпечення довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС за умови забезпечення безпеки на рівні, відповідному вимогам сучасних норм, правил і стандартів з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), вимогам з безпеки МАГАТЕ і кращому міжнародному досвіду та практиці.

З огляду на вищевикладене, для елементів і конструкцій, важливих для безпеки, актуальним залишається завдання забезпечення і підтвердження їх працездатності (міцності, цілісності, геометричної стабільності і т.п.) в умовах нормальної експлуатації, порушення нормальних умов експлуатації та аварійної ситуації, як на етапі проєктної, так і довгострокової експлуатації з урахуванням вимог діючих норм, правил і стандартів з ЯРБ, які зазвичай є більш жорсткими, ніж вимоги нормативних документів, які застосовувалися на етапі первинного проєктування і вже скасовані.

Проєктний термін експлуатації парогенератора становить 30 років. Оцінка технічного стану ПГ свідчить, що на теплообмінній поверхні з роками спостерігаються відкладення (шлам), які викликають утворення дефектів. Оцінка цих дефектів з точки зору їх впливу на напружено-деформований стан (НДС) ТОТ, є досить нетривіальним завданням, оскільки необхідно врахувати і оцінити не тільки вплив і критичні розміри дефектів, а й вплив супутніх чинників, таких як шлам і його вплив на НДС. Відповідні дослідження, які розпочато в роботах [1 – 3, 25, 27, 28], показали, що шлам, який утворився на ТОТ, значно змінює умови їх закріплення. Це, відповідно, знижує проєктні можливості переміщень ТОТ, що призводить до утворення локальних зон з високим рівнем напружень.

Для поглибленого аналізу НДС ТОТ необхідно крім налипання шламу врахувати також зміну НДС внаслідок утворення дефектів і оцінити, які саме дефекти є найбільш небезпечними. Результати оцінки небезпеки таких дефектів, як тріщини, і їх вплив на НДС ТОТ, представлено в цій роботі.

1. Механізми утворення дефектів ТОТ.

ПГ працює у складних експлуатаційних умовах. Згідно даних [3, 9] та досвідом експлуатації [7, 16], основними факторами, що впливають на утворення дефектів у ТОТ є надмірні відкладення на трубках і концентрація корозійно-активних сумішей у воді ПГ.

Механізм утворення відкладення на трубках, за даними [11, 13], може бути описаний таким чином:

надходження із живильною водою іонів, розчинених молекул і дрібнодисперсних частинок оксидів заліза і міді (гідратованих і дегідратованих);

осад міді, що потрапляє у воду парогенератора і мідь містять елементи обладнання другого контуру на поверхні ТОТ;

концентрування хлор-іонів в результаті довиваровування води в уже сформованих відкладеннях.

Згідно з даними, зокрема [16, 29], відкладення або «шлам», утворені на трубках ПГ, являються локальною зоною скупчення шламу у ПГ (рис. 1), що по суті є налипанням дрібних часток оксидів заліза і міді, склеєних між собою сольовими домішками (іони натрію, хлорид-іони, сульфат-іони), які з часом збільшуються в обсязі і за ступенем налипання на трубки ПГ (якщо не проводити хімічну промивку).

За даними звіту про стан ПГ на АЕС України [10] відкладення / шлам можна охарактеризувати, як «металеву стружку», що налипла на ТОТ з середньою величиною густини складових шламу: $\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$ – густина оксиду заліза ($\rho_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 5,2 \text{ г/см}^3$); $\rho_{\text{Cu}_2\text{O}}$ – густина оксиду міді ($\rho_{\text{Cu}_2\text{O}} = 6,3 \text{ г/см}^3$); ψ – пористість відкладення ($\psi = 0,3$).

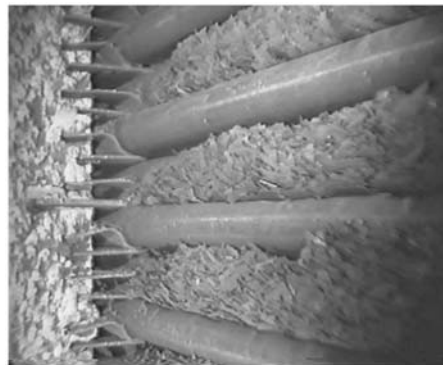


Рис. 1

Механізм і причини розвитку корозійних процесів у ПГ [10, 16] схематично можна представити так:

корозія і ерозія обладнання і трубопроводів призводять до надходження продуктів корозії заліза і міді з живильною водою у ПГ;

в ПГ у результаті випаровування води продукти корозії концентруються і відкладаються у першу чергу на поверхнях теплообміну;

у місцях відкладення і скупчення шламу, у щілинах і зазорах на теплообмінних поверхнях концентруються суміші (так званий процес Хайд-аут);

аналогічні пошкодження виникають внаслідок гальванічної корозії контактної пари мідь – залізо (недостатнє відмивання від міді, малі швидкості дренажу розчинів).

Дослідження [24] також вказують на те, що у нижній зоні трубчаткі ПГ основними типами ушкодження є: виразки (приблизно 55%); роз'ятрення / плями (приблизно 25%); тріщини з розтріскуванням (приблизно 20%).

Результати досліджень [24] свідчать про негативний вплив відкладення / шламу на поверхні ТОТ з точки зору того, що формуються умови, які можуть негативно вплинути на цілісність трубчаткі під дією екстремальних перепадів тиску і температури, характерні для умов протікання аварійних подій (жорсткого термосилового навантаження).

В процесі експлуатації виявлялися різні випадки пошкодження ТОТ. Такі випадки були обумовлені, в основному, наявністю дефектів двох основних типів: потоншення стінки (викликана корозійною виразкою або плямою) і тріщина (також викликана корозійними процесами агресивного хімічного середовища експлуатації ПГ). З точки зору оцінки впливу такого ефекту старіння, як потоншення стінки, розглянуто підходи до визначення мінімально допустимої товщини стінки прямої ділянки і згину трубопровода, а для оцінки впливу тріщини розглянуто підходи до її оцінки з точки зору механіки руйнування.

2. Оцінка НДС ТОТ при наявності дефектів у вигляді тріщини.

Визначенню впливу ступеня небезпеки дефектів на міцність трубопроводів різними методами присвячено багато наукових праць і досліджень. Їх результати узагальнено, зокрема, у таких роботах, як [8, 16 – 19, 29].

У випадках, коли максимальні напруження збігаються з мінімальними властивостями матеріалу, в інженерній практиці прийнято використовувати підхід постулювання поверхневих тріщиноподібних дефектів. Тріщини можуть бути поздовжніми та поперечними і мати різні геометричні розміри. Приймається, що тріщина, яка перебуває у трубчастому елементі ПГ, вже утворилася у результаті агресивного впливу середовища (хімічного і термічного), в якому експлуатується ПГ.

Початок росту тріщини передбачає визначення критичного стану рівноваги відповідно до критеріїв механіки руйнування. Критеріїв руйнування досить багато, проте практичне застосування і загальне визнання отримали тільки кілька [2, 12, 18, 20, 21, 23, 24]. До цих критеріїв слід віднести наступні: коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН, K_I), інваріантний енергетичний інтеграл (J -інтеграл) і розкриття тріщини у своїй вершині (δ). І саме ці критерії закладено в основу розрахунку тріщин програмою ANSYS [15], яку використано в рамках цієї роботи.

Підходи для розрахунку КІН (K_I) знайшли широке застосування у нормах і правилах, що діють в області атомної енергетики, визнано консервативними і використовуються при проектуванні.

Умову міцності у цьому випадку або умову досягнення граничного стану можна записати як:

$$K_I \leq K_{IC}, \quad (1)$$

де: K_{IC} – граничний КІН (в'язкість руйнування) являє собою механічну характеристику матеріалу, що характеризує його опір росту тріщини при крихкому руйнуванні.

КІН (K_I) за різними джерелами може визначатися різними способами. Наприклад, відповідно до ПНАЕ Г-7-002-86 [10] коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м^{1/2}, для циліндричних, сферичних, конічних, еліптичних, плоских елементів, що навантажені внутрішнім тиском і температурним впливом, допускається визначати за формулою:

$$K_I = \eta(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q) (\pi(\alpha/10^3))^{1/2} / Q, \quad (2)$$

де η – коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напружень; σ_p – складова напружень розтягу (МПа); σ_q – складова згинальних напружень (МПа); $M_p = 1 + 0,12 \times (1 - a/c)$; $M_q = 1 - 0,64 a/h$; a – глибина тріщини, мм; c – напівдовжина тріщини, мм; h – довжина зони, в межах якої складова згинальних напружень зберігає позитивне значення (мм);

$$Q = [1 + 4,6(a/2c)^{1,65}]^{1/2}. \quad (3)$$

Матеріалом трубчатки ПГ є сталь 08X18H10T. Як критерій, на підставі даних [18], прийнято (для температури 350°C):

$$[K_I] = 55 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (4)$$

Для оцінки впливу дефектів на НДС ТОТ вибрано зовнішню лінію ТОТ верхнього шару трубчатки, яка має дуже великі відстані між опорними елементами, з максимальними температурними деформаціями. При цьому для обраної лінії ТОТ прийнято максимуми, які отримано за результатами аналізу НДС при перехідному процесі і обраній фрагмент, який знаходиться у зоні максимального забруднення [16].

У даному випадку розміри поверхневої тріщини прийнято відповідно до вимог ПНАЕ Г-7-002-86 [10] наступним чином:

глибина $a = 0,375$ мм (що становить 25% товщини стінки теплообмінної поверхні трубки) $1,5 \cdot 0,25 = 0,375$;

напівдовжина $l = 0,563$ мм.

Результати розрахунку КІН (аналітичне рішення) за формулою (2) з параметрами тріщини, що зазначені вище, свідчать про те, що КІН дорівнює:

$$K_I = \eta(\sigma_p M_p + \sigma_q M_q) = 1,713 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (5)$$

Зазначений розрахунок виконано із застосуванням таких вихідних даних: $D_{\text{ТОТ}} = 0,016$ м – діаметр ТОТ; $h_{\text{ТОТ}} = 0,0015$ м – товщина стінки ТОТ; сталь 8X18H10T – матеріал ТОТ; $E = 0,0185$ МПа – модуль пружності; $\rho_{\text{ТОТ}} = 8021$ кг/м³ – густина ТОТ; $\nu = 0,3$ – коефіцієнт Пуассона. Внутрішній тиск при нормальних умовах експлуатації (НУЕ) прийнято як різницю між тиском 1-го і 2-го контурів: $P_{\text{вн}} = (17,64 - 7,84) = 9,8$ МПа.

Розрахунки КІН із застосуванням програмного засобу ANSYS (чисельне рішення) виконані для зовнішньої і внутрішньої поверхні, так як причиною пошкодження ТОТ є неприпустимий рівень питомого забруднення як зовні, так і всередині поверхні ТОТ. Значення КІН для зовнішньої і внутрішньої поверхні майже не відрізняються один від одного, що характерно для тонкостінних оболонок і оболонок середньої товщини за рахунок відсутності суттєвого температурного градієнта по товщині стінки при термосиловому навантаженні.

Таблиця 1

Рішення	КІН, МПа·м ^{1/2}	
	K_I	$[K_I]$
Аналітичне рішення (за формулами ПНАЕ Г-7-002-86)	1,713	55
Чисельне рішення (ANSYS)	1,290	

Результати аналітичного і чисельного розв'язання представлено у табл. 1 і свідчать про те, що вони досить добре узгоджуються між собою.

3. Оцінка НДС ТОТ при наявності дефектів у вигляді потоншення.

Для оцінки впливу потоншення стінки на НДС ТОТ розглянуто допустиму товщину стінки для прямої ділянки і згину ТОТ. Розрахунки міцності ТОТ виконувалися відповідно до «атомних» норм у пружній постановці. У цьому аналізі розглядаються потоншення ТОТ загального вигляду, які характеризуються такими розмірами: напівдовжиною « c », напівшириною « b », глибиною « a » і товщиною стінки « s » (рис. 2).



Рис. 2

Таблиця 2

Ступінь стоншення, %	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження (МПа) по (6)	Розрахункове напруження (МПа) по (7)	Розрахункове напруження σ_r^d (МПа) по (8)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20	177	60,43	65,46	70,42	412
30	177	69,77	75,51	93,86	412
40	177	82,21	88,91	111,15	412
50	177	99,63	107,67	142,05	412
60	177	125,77	135,81	194,85	412
70	177	169,32	182,72	275,37	412
80	177	256,43	276,53	673,83	412

У табл. 2 наведено результати розрахунків згідно існуючої Методики [9], коли не визначається глобальний НДС ТОТ і вплив температурних напружень: номінальне розрахункове напруження для прямої ТОТ

$$(\sigma)_l^H = \frac{P(D-s)}{2s}; \quad (6)$$

напруження на внутрішній поверхні згину ТОТ

$$(\sigma)_l^H = \frac{P(D \cdot Y(\theta) - s)}{2s}; \quad (7)$$

напруження з урахуванням спільної дії внутрішнього тиску і згинального моменту на ТОТ

$$\sigma_r^d = \frac{\frac{\sigma_r^{M_\varphi}}{\alpha_M} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_r^{M_\varphi}}{\alpha_M}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_\varphi}{\sigma_p}\right)^2}}{2}. \quad (8)$$

Аналіз розрахунків показав, що при втраті товщини стінки ТОТ більше 50% напруження у ТОТ перевищують границю плинності матеріалу ТОТ.

Це свідчить про те, що у подальшому при визначенні НДС ТОТ з потоншенням стінки у ситуаціях суттєвого термосилового навантаження їх розрахунок бажано проводити у припущенні роботи матеріалу в пружнопластичній зоні [2, 12, 20]. Для досконалого аналізу НДС ТОТ в умовах значного термосилового навантаження обрано систему диференціальних рівнянь (9), що описують пружнопластичний стан оболонок обертання змінної товщини з довільною формою меридіана при дії осесиметричних силових і теплових навантажень [21, 26], які наведено нижче:

$$\frac{drN_s}{ds} + \frac{r}{R_s} Q_s - N_\varphi \cos\theta + r q_s = 0; \quad \frac{drQ_s}{ds} - \frac{r}{R_s} N_s - N_\varphi \sin\theta + r q_s = 0;$$

$$\frac{drM_s}{ds} - r Q_s - M_\varphi \cos\theta + r M_s = 0;$$

$$\varepsilon_s = \frac{u}{ds} + \frac{w}{R_s}; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} \cos\theta + \frac{w}{r} \sin\theta;$$

$$\chi_x = \frac{d}{ds} \left(\frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{dv}{ds}; \quad \chi_y = \frac{\cos\theta}{r} \left(\frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds} \right) = \frac{\cos\theta}{r} v;$$

$$v = \frac{u}{R_s} - \frac{dw}{ds};$$

$$N_s = C_1 \varepsilon_s + C_2 \varepsilon_\varphi + K_1 x_s + K_2 x_\varphi - N_T; \quad N_\varphi = C_2 \varepsilon_s + C_1 \varepsilon_\varphi + K_2 x_s + K_1 x_\varphi - N_T;$$

$$M_s = K_1 \varepsilon_s + K_2 \varepsilon_\varphi + D_1 x_s + D_2 x_\varphi - M_T; \quad M_\varphi = K_2 \varepsilon_s + K_1 \varepsilon_\varphi + D_2 x_s + D_1 x_\varphi - M_T;$$

$$C_1 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} d\zeta; \quad C_2 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} d\zeta;$$

$$K_1 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E^* \zeta}{1-\nu^{*2}} d\zeta; \quad K_2 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} \zeta^2 d\zeta;$$

$$D_1 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E^* \zeta^2}{1-\nu^{*2}} d\zeta; \quad D_2 = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{\nu^* E^*}{1-\nu^{*2}} \zeta^2 d\zeta;$$

$$N_T = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} \varepsilon_T d\zeta; \quad M_T = \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E^*}{1-\nu^{*2}} \varepsilon_T \zeta d\zeta. \quad (9)$$

Для розрахунку пружнопластичних деформацій (починаючи з 3%) за допомогою ANSYS необхідно задати діаграму деформування матеріалу у координатах «інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ε_i ».

Задовільну відповідність експериментам дає статична апроксимація діаграми деформування для введення у розрахунків пластичних деформацій (10):

$$\sigma = \begin{cases} E^T, & \sigma < R_{pe}^T; \\ K^T \varepsilon^{\nu}, & \sigma > R_{pe}^T; \end{cases} \quad K^T = \frac{R_{pe}^T}{\varepsilon_{pe}^{\nu}} \varepsilon_{pe} = \frac{R_{pe}^T}{E^T};$$

$$R_{pe}^T = \left[\frac{R_{p0,2}^T}{(R_{p0,2}^T + 0,002E^T)^{\nu}} \right]^{\frac{1}{1-\nu}}; \quad \nu = \frac{0,73 \lg \left[(1 + 0,014Z^T) R_m^T / R_{p0,2}^T \right]}{\lg \left[\frac{-2,3E^T \lg(1 - Z^T / 100)}{R_{p0,2}^T + 0,002E^T} \right]}, \quad (10)$$

де R_{pe}^T – показник зміцнення матеріалу; K^T – модуль зміцнення при заданій температурі; ν – показник зміцнення; E^T – модуль пружності при заданій температурі. Отримана залежність для сталі 08X18H10T, з якої виготовлені ТОТ, наведена на рис. 3 і добре узгоджується з експериментальними даними.

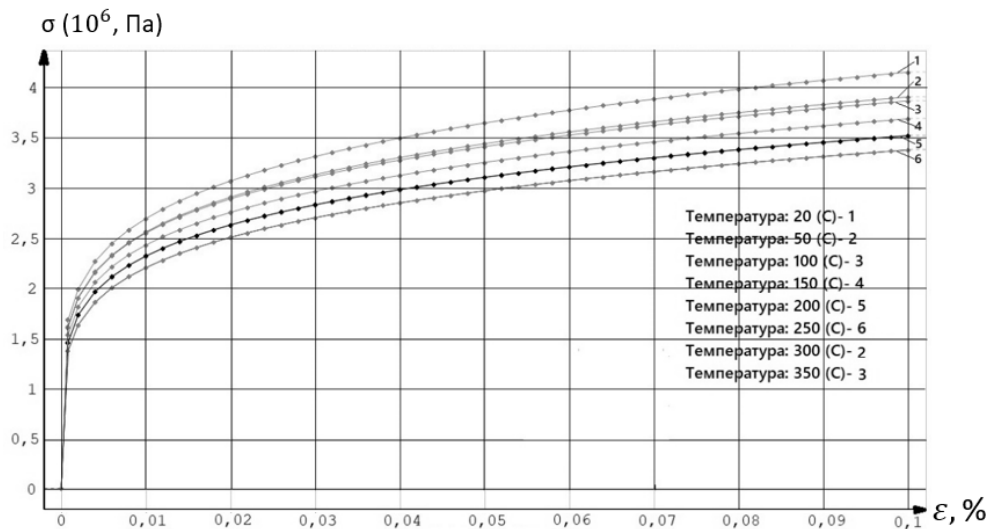


Рис. 3

У програмному комплексі ANSYS [16] використовується метод пружного розвантаження, який вважається найбільш адекватним і обґрунтованим для металевих оболонок обертання і підтверджується експериментальними і теоретичними [12, 22] дослідженнями.

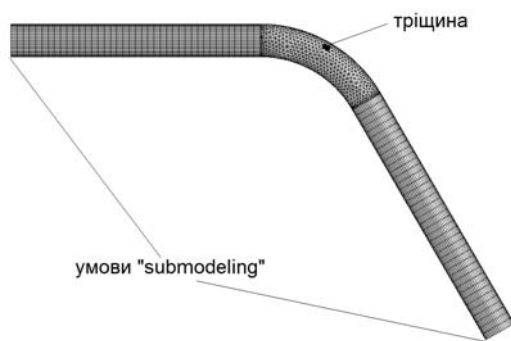


Рис. 4

Значну увагу приділено розрахунку НДС ТОТ на ділянках їх згину (рис. 4). Зведені результати розрахунків впливу потоншення на напружений стан ТОТ при нормальних умовах експлуатації (НУЕ) на згинах наведено у табл. 3.

Потоншення задані у вигляді дефекту загального вигляду з довжиною 40 мм із різним ступенем потоншення від 20% до 80%. У розрахунках прийнято навантаження на ТОТ при НУЕ, тобто: $\Delta P = 9,8$ МПа ; $T = 350^\circ\text{C}$ (температура поверхні ТОТ); радіус ТОТ

$R = 0,008$ м; товщина ТОТ $h = 0,0015$ м; радіус згину $R = 0,6$ м.

Таблиця 3

Ступінь стоншення, %	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження (МПа) по (6)	Розрахункове напруження $(\sigma)_2$ (МПа) ANSYS. Пружна постановка	Розрахункове напруження $(\sigma)_2$ (МПа) ANSYS. Пружно-пластична постановка	Границя міцності R_m^T (МПа)
20	177	70,421	76	76	412
30	177	93,864	93	93	412
40	177	111,151	115	101	412
50	177	142,046	145	138	412
60	177	194,854	198	190	412
70	177	275,373	285	280	412
80	177	673,834	480	470	412

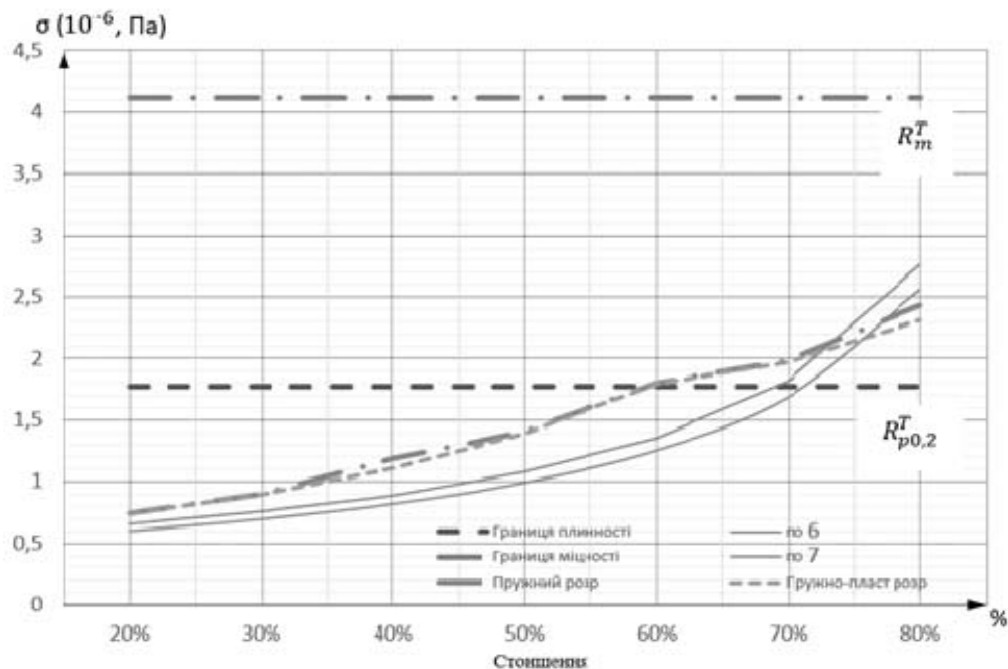


Рис. 5

Залежність НДС ТОТ від ступеня потоншення представлено на рис. 5. Аналіз розрахунків, приведених у табл. 2 і 3 показав, що при втраті товщини стінки ТОТ більше 50% напруження у ТОТ перевищують границю плинності. При визначенні НДС ТОТ з потоншенням при значному термосиловому навантаженні (в аварійних ситуаціях) їх розрахунок виконаний у пружно-пластичній постановці.

4. Аналіз НДС ТОТ при термомеханічному навантаженні і при наявності дефектів.

Далі розглядається вплив тріщини і потоншення стінки на НДС ТОТ при термомеханічному навантаженні. Аналіз НДС трубчастих елементів ПГ і оцінка цілісності ТОТ виконана для двох граничних випадків:

1) «Термомеханічне навантаження 1 (жорстке)» (з точки зору виникнення термічних напружень) – на зовнішній поверхні теплообмінної трубки приймалося міні-

мальне значення температури 5°C, а на внутрішній поверхні значення температури приймалося 320°C ;

2) «Термомеханічне навантаження 2» – температура води 2-го контуру в верхньому обсязі трубчаткі знаходиться у діапазоні 278–295°C, а на внутрішній поверхні теплообмінної трубки значення температури приймалося 320°C.

Оцінку цілісності трубчаткі виконано із застосуванням програмного засобу ANSYS за принципом субмоделінга.

НДС трубчаткі досліджується у часі від моменту початку перехідного процесу до моменту початку подачі аварійної живильної води на 2460 сек. Динаміка аварійного процесу і її вплив на НДС трубчаткі досліджується для тимчасових інтервалів 3 сек, 80 сек, 1375 сек, 2460 сек, 3000 сек. На момент часу 2460 сек температура води всередині ПГ становить близько 300°C і починається подачею аварійної живильної води з температурою 5°C. Результати розрахунку свідчать про те, що при протіканні перехідного температурного процесу екстремуми напружень локалізуються у зонах різних опорних елементів по всій довжині трубки, яка досліджується. Для подальшої оцінки цілісності трубчаткі обрано зовнішність ТОТ верхнього шару трубчаткі, яка має максимально великі відстані між опорними елементами, з максимальними температурними деформаціями.

Аналіз НДС ТОТ при жорсткому термомеханічному навантаженні свідчить про те, що найбільш навантаженою ділянкою є згин. Досліджена найбільш напружена ділянка трубопроводу, для якого постулюється втрата металу стінки від 20% до 80% при заданих навантаженнях, а також кінематичних і граничних умовах (з урахуванням впливу шару шламу). Постановка задачі термопружності виконується за рівняннями (9).

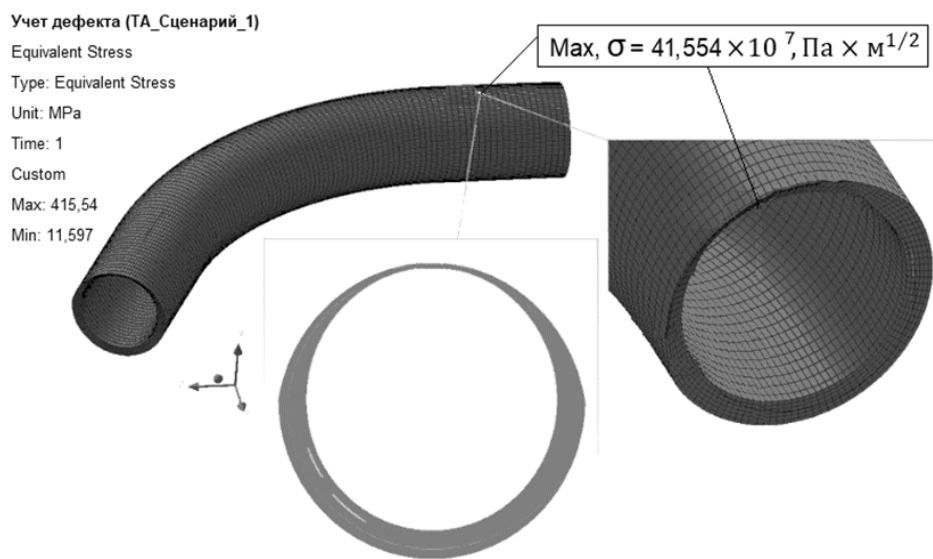


Рис. 6

Дефект у вигляді локального потоншення стінки на згині ТОТ (рис. 6) постулюється у місці локалізації максимальних напружень за результатами попереднього розрахунку. Максимальні значення напружень для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% і 80% у ТОТ наведено у табл. 4.

Проведений ітераційний аналіз визначення НДС для потоншень 20%, 50%, 60%, 65%, 70% і 80% свідчить про те, що граничним значенням потоншення, при якому виникає порушення цілісності ТОТ в умовах аварії є 70% втрати матеріалу від товщини стінки.

З урахуванням результатів досліджень [18, 23] для найбільш навантаженої ділянки ТОТ створено модель згину з тріщиною, яка представлена на рис. 4.

Таблиця 4

Ступінь стоншення, %	Границя плинності $R_{p0,2}^T$ (МПа)	Розрахункове напруження σ (МПа)	Границя міцності R_m^T (МПа)
20	177	255	412
50	177	270	412
60	177	305	412
65	177	349	412
70	177	382	412
80	177	415	412

Модель прямої ділянки з тріщиною представлено на рис. 7. Кількість скінченних елементів – 309786. Кількість вузлів – 571121. Використано елемент типу SOLID187. Тріщина – напівеліптична. Кількість елементів по фронту тріщини – 50, вузлів – 101.

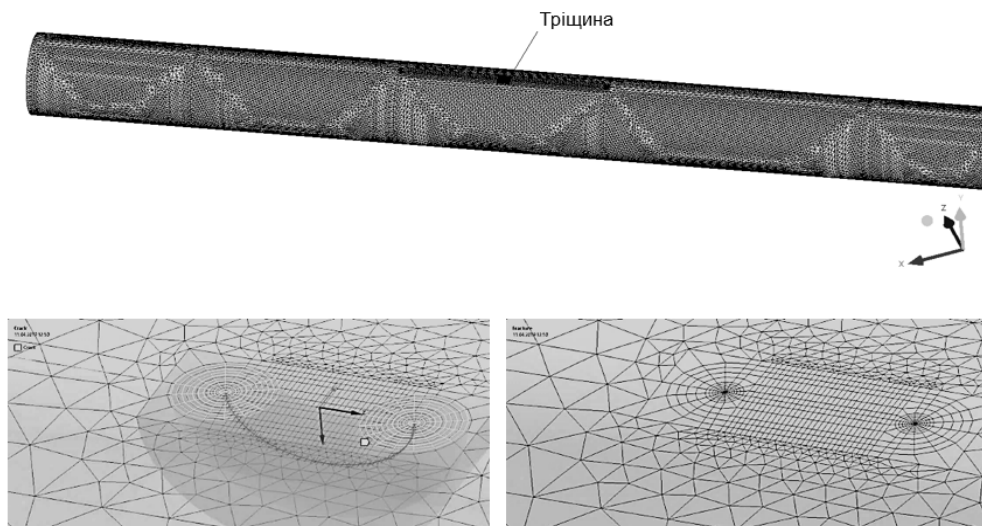


Рис. 7

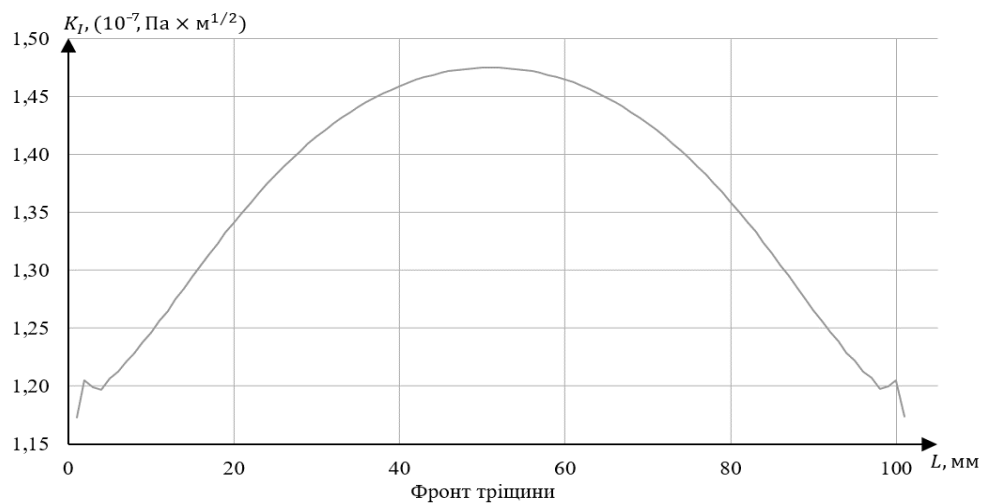


Рис. 8

Розподіл КІН по фронту тріщини на прямій ділянці ТОТ у випадку «Термомеханічне навантаження 1» представлено на рис. 8.

Розподіл КІН по фронту тріщини для згину у випадку «Термомеханічне навантаження 1» представлено на рис. 9.

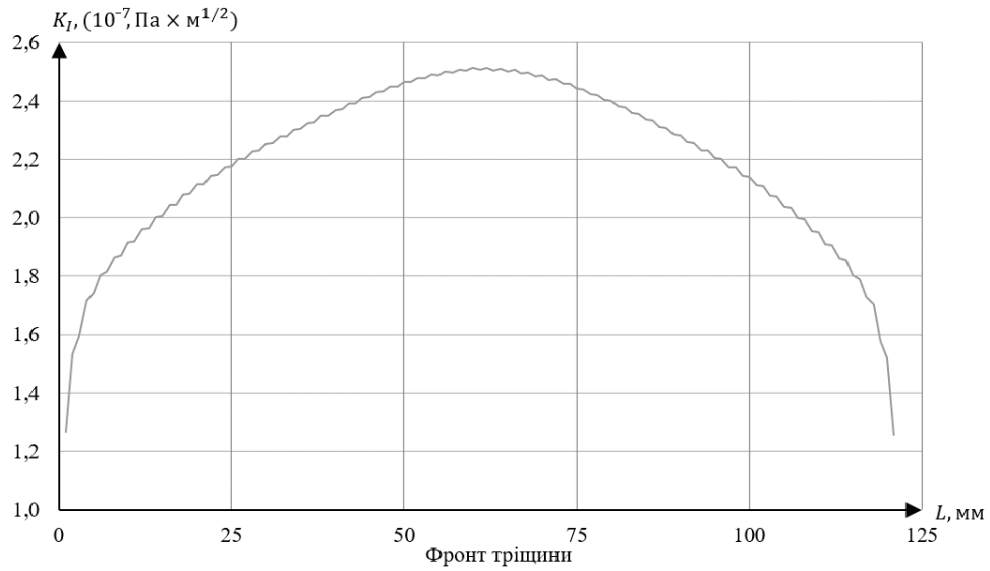


Рис 9

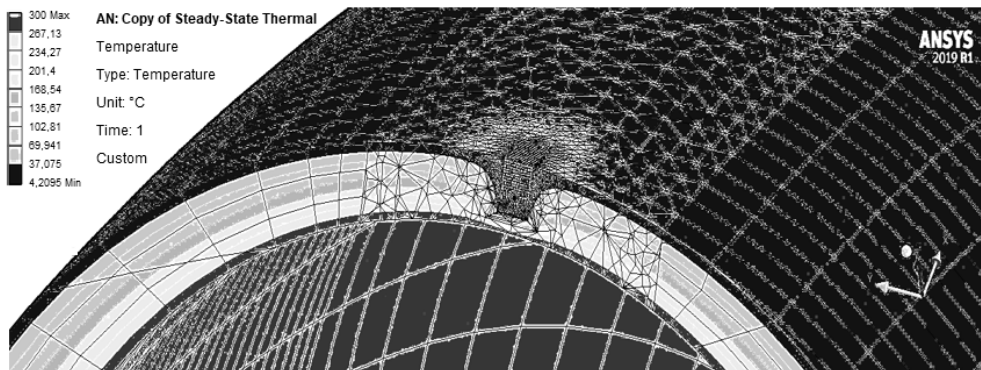


Рис 10

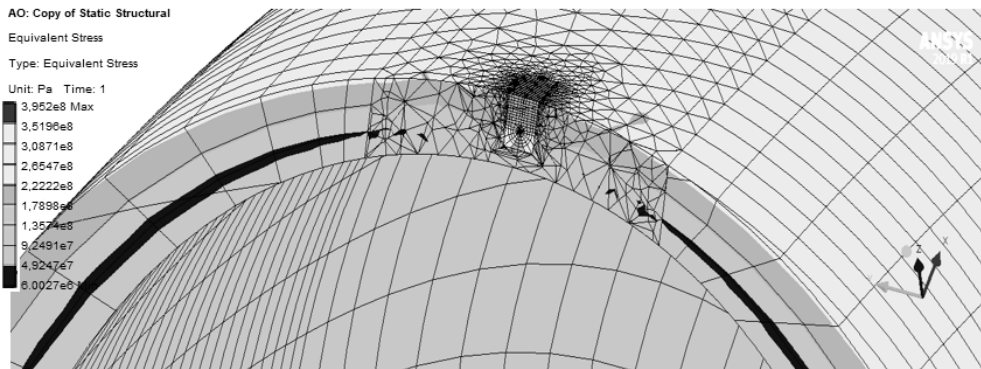


Рис 11

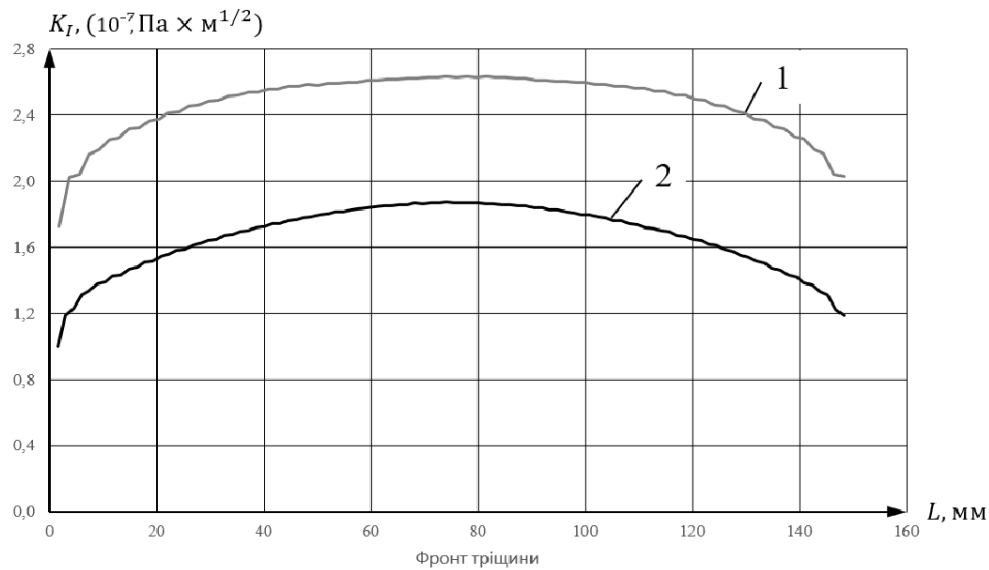


Рис 12

Розподіл температурних полів у згині ТОТ при реалізації випадку «Термомеханічне навантаження 1» представлено на рис. 10, а розподіл напружень у згині ТОТ представлено на рис. 11.

Розрахунковий розподіл КІН по фронту тріщини для згину у випадку «Термомеханічне навантаження 1» без потоншення (крива 1) і 50% (крива 2) потоншення стінки представлено на рис. 12.

В табл. 5 представлена загальна картина зіставлення розрахункових результатів КІН (K_I) з допустимими ($[K_I]$).

5. Аналіз результатів розрахунків НДС ТОТ при наявності тріщини.

Як видно з табл. 5, умови крихкої міцності задовольняються з істотним запасом у всіх випадках термомеханічного навантаження. Це зрозуміло, оскільки ТОТ є циліндричною оболонкою середньої товщини, стінка якої миттєво прогривається / охолоджується, що істотно пом'якшує наслідки термосилового навантаження в умовах аварії. Таким чином, необхідно відзначити, що цілісність ТОТ зберігається за умови потоншення стінки у місці згину до 50% при постульованій у потонщенні тріщині глибиною 0,25S (тобто залишкова товщина стінки у цьому випадку досягає 0,56 мм, що є менше 60% втрати матеріалу). У той же час, критерії крихкої міцності у цьому випадку дотримуються з істотним запасом, оскільки термомеханічні навантаження, що виникають всередині ПГ при проходженні аварійного процесу, є меншими за ті, що може утримати матеріал ТОТ.

Таблиця 5

Вид навантаження	КІН		
	K_I (МПа · м ^{1/2})		$[K_I]$
	Пряма ділянка	Згин	
Термомеханічне навантаження 1	15,25	25,11	55
Термомеханічне навантаження 1 (стоншення в згині 50%)	–	26,2	
Термомеханічне навантаження 2	1,29	1,31	

Дослідженнями [12] встановлено, що граничним значенням потоншення, при якому виникає порушення цілісності трубки теплообмінної поверхні в умовах аварії, є втрата матеріалу від товщини стінки понад 80% (для згину, як найбільш навантажено-

го елемента). І саме дефекти втрати матеріалу викликають найбільш значущий вплив на НДС і, відповідно, цілісність ТОТ.

Отримані результати розрахунку досить добре узгоджуються з експериментальними даними, результати яких наведено у роботі [13]. В ній зазначається, що дослідженнями несучої здатності ТОТ з дефектами і без обґрунтована можливість застосування ТОТ діаметром 16×1,5 для трубного пучка ПГВ-1000МКП і продемонстровано можливість експлуатації ТОТ з дефектами глибиною до 85% при впровадженні заходів щодо мінімізації процесів, що викликають корозію трубних пучків.

Висновки.

У даній роботі досліджено причини, що зумовлюють появу дефектів на поверхні ТОТ, встановлено найбільш характерні дефекти, виконано оцінку впливу тріщини на НДС і цілісність ТОТ.

Результати цих розрахункових досліджень і виконаних на попередніх стадіях [6, 20] показали таке:

1) цілісність ТОТ зберігається за умови потоншення стінки у місці згину до 50% при постульованій у потоншенні тріщині глибиною 0,25S (тобто залишкова товщина стінки у цьому випадку досягає 0,56 мм, що є менше 60% втрати матеріалу);

2) граничним значенням потоншення, при якому виникає порушення цілісності трубки теплообмінної поверхні в умовах аварії, вважається втрата матеріалу від товщини стінки понад 80% (для згину, як найбільш навантаженого елемента);

3) найбільш значущий вплив на НДС і відповідно цілісність ТОТ викликають дефекти втрати матеріалу у вигляді потоншення.

Наукові дослідження, результати яких опубліковані в даній статті, виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка пріоритетних напрямків наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

РЕЗЮМЕ. У процесі експлуатації парогенератора (ПГ) через особливості водно-хімічного і температурного режиму виникає забруднення теплообмінних труб (ТОТ) та поверхні ПГ шламом. Скупчення шламу може впливати на виникнення різних дефектів, таких як потоншення стінки, тріщини, пігінг тощо. У випадку коли дефекти співпадають із додатковим навантаженням від шламу, додаткової маси на трубі, обмеженням можливості проектного переміщення трубки, НДС ТОТ може суттєво змінитися. З метою достовірної оцінки НДС ТОТ у місцях скупчення шламу, оцінки його впливу і за наявності дефектів виконані відповідні дослідження. Представлено результати дослідження тріщини на НДС ТОТ та її цілісність.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: парогенератор, трубка теплообмінника, шлам, напружено-деформований стан.

1. *Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н.* Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). – Москва: Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.
2. *Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степанова Л.В.* Нелинейная механика разрушения. – Самара: Самарский ун-т, 2001. – 632 с.
3. *Бакиров М.Б., Клецул М.С., Чубаров С.В. и др.* Разработка атласа дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР // 7-й межд. семинар по горизонтальным парогенераторам (Подольск, 3 – 5 октября 2006). – Подольск: ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
4. *Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»* (розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 р. – № 605-р).
5. *Комплексна програма робіт щодо подовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій* (постанова КМУ від 29.04.2004 № 263-р).
6. *Лукашевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е.* Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – Москва: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 391 с.
7. *Мамет В.А., Мартынова О.И.* Процессы «хайд-аут» (местного концентрирования) примесей котловой воды парогенераторов АЭС и их влияние на надежность работы оборудования // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 2 – 7.

8. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – Москва: Физматлит, 2006. – 328 с.
9. МТ-Т.0.03.224.11. Методика определения допустимых толщин элементов трубопроводов АЭС из углеродистых сталей подверженных действию эрозионно-коррозионного износа.
10. Неклюдов И.М., Ожигов Л.С., Митрофанов А.С. и др. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов Южно-Украинской АЭС // 7-й междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам (Подольск, 3 – 5 октября 2006). – Подольск: ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
11. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.
12. «Отчет о состоянии парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 энергоблоков АЭС Украины за 2014 год». – Отчет ГП НАЭК «Энергоатом». Киев, 2015, – 166 с.
13. Попадчук В.С., Трунов Н.Б., Брыков С.И. и др. Обоснование рекомендаций по обеспечению проектного ресурса теплообменных труб парогенератора типа ПГВ-1000МКП // 8-й междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам (Подольск, 19 – 21 мая 2010). – Подольск: ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
14. Прочность материалов и конструкций: Серия монографий (под общей ред. В.Т.Трошенко): в 5-и томах. Т.4. Орыняк И.В. Расчеты на прочность трубопроводов с дефектами. – Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – 2011. – 472 с.
15. Расчетный комплекс «ANSYS», разрешенный к использованию в ГП НАЭК «Энергоатом» (введено в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 № 137-р).
16. Харитонов Ю.В., Брыков С.И., Трунов Н.Б. Прогнозирование накопления отложений продуктов коррозии на теплообменных поверхностях парогенератора ПГВ-1000М // Теплоэнергетика. – 2001. – № 8. – С 20 – 22.
17. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – Москва: Наука, 1974. – 640 с.
18. Шугайло А.П., Мустафин М.А., Шугайло А-р П. и др. Основные результаты оценки целостности теплообменных трубок парогенератора энергоблока № 3 Ривненской АЭС в процессе управления аварией // Ядерна та радіаційна безпека. – 2017, № 3. – С. 18 – 24.
19. Ainsworth R.A. The assessment of defects in structures of strain hardening material // Engin. Fract. Mech. – 1984. – 19. – P. 633 – 642.
20. Andrade E.Q., Benjamin A.C. Structural Evaluation of Corrosion Defects in Pipelines: Comparison of FE Analyses and Assessment Methods // 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE 2004, May 2004. – P. 120 – 127.
21. Babeshko M.E., Savchenko V.G. Elastoplastic Axisymmetric Deformation of Shells Under Thermomechanical Loading and Radiation // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 6. – P. 620 – 628.
22. Carlson P.A., Kratzer W.K.N. Reactor steam generator performance // Nuclear Technology. – 1976. – 28. N 3. – P. 383 – 387.
23. Lugovoi P.Z., Shugailo A.P., Krugliei Ya.D., Kolupaev A.M. Effect of Sludge on the Stress-Strain State of Heat-Exchange Tubes of a Steam Generator // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 1. – P. 86 – 94.
24. Lugovoi P.Z., Skosarenko Yu.V., Orlenko S.P., Shugailo A.P. Application of the Spline-Collocation Method to Solve Problems of Statics and Dynamics for Multilayer Cylindrical Shells with Design and Manufacturing Features // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 5. – P. 524 – 533.
25. Orynyak I.V., Krasovskiy A.Ya., Borodiy V.M., Ageev S.M. Development of procedure for determination of wall thickness in NPP pipeline at erosion – corrosion wear of material // Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – 2017. – N 4. – P. 14 – 24.
26. Savchenko V.G., Babeshko M.E. Technique of Allowing for Plastic Strains under Unloading in Thermoplasticity Problems for Axisymmetric Bodies // Int. Appl. Mech. – 2019. – 55, N 4. – P. 416 – 425.
27. Splichal K., Mikus M., Petrecky I. Effect of water chemistry on WWER steam generator corrosion damage // Proceedings of IAEA. Specialists meeting, Ostrava, Czech Republic. – 1996. – P. 268 – 283.
28. Steam Generator Tube Integrity Program/Steam Generator Group Project: Final Project Summary Report (NUREG/CR-5117) Prepared by: R.J. Kurtz, R.A. Clark, E.R. Bradley, et al. Pacific Northwest Laboratory Richland, WA 99352. Date Published: May 1990.
29. Tatone O.S., Pathania R.S. Learning lesson of steam generators operating experience // Nuclear Engineering Int. – 1983, September. – P. 29 – 33.

Надійшла 04.11.2019

Затверджена до друку 15.12.2020