

ОЦІНКА ТЕНДЕНЦІЇ МОЖЛИВОГО НЕБЕЗПЕЧНОГО ВПЛИВУ АС «22.10.85» НА ЦИКЛІЧНУ ПОШКОДЖУВАНІСТЬ, НА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ І НА ПРОГНОЗ ТЕРМІНУ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КР

Д.1 Вихідні дані

Розробник даного Аналізу усвідомлює, що прийняті значення навантажень та залежності їх зміни в часі при режимі «22.10.85» консервативні, приблизні, прийняті в умовах майже повної відсутності фактичних даних про цей режим. Одержані результати можуть бути використані лише в цілях даного Аналізу і можуть свідчити лише про небезпечні тенденції щодо міцності і прогнозу ресурсу реактору енергоблоку № 1 ВП ЮУАЕС.

Розглядається зварне з'єднання № 3 КР. Під визначенням «наплавлення» мається на увазі метал стінки КР від внутрішньої поверхні КР до глибини 9 мм. Під визначенням «основний метал» мається на увазі метал окрім наплавлення глибиною від 9 мм до 200 мм.

Враховуючи вищесказане, враховуючи вкрай обмежені дані про режим «22.10.85» і вкрай стислі терміни виконання даного Аналізу згідно умов договору №ЦПХ № 10 від 01 липня 2014 року, керуючись принципом консервативності, прийняті наступні припущення і вихідні дані:

- 1) навантаження при режимі «22.10.85».

Тиск теплоносія першого контуру на протязі всього режиму дорівнює 17 МПа.

Оскільки розглядається зварне з'єднання КР, в якому діють залишкові напруження від зварювання $\sigma_{зал.}$, з урахуванням даних пункту 6.1 рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2], прийнятий наступний закон розподілу цих напруг по товщині стінки КР:

$$\sigma_{зал.} = 60 \cdot \cos\left(\frac{2\pi x}{s}\right); \text{МПа.}$$

При аварійному охолодженні внутрішньої поверхні стінки реактору швидкість цього охолодження відповідає даним публікації [Пб.6] і дорівнює:

$$1800^\circ\text{C}/\text{год} = 0,5^\circ\text{C}/\text{сек.}$$

З урахуванням цієї швидкості, температура внутрішньої поверхні стінки реактору на початку режиму знижується з 290°C до 100°C за 380 секунд і в подальшому утримується в межах 100°C до зникнення температурного градієнту по товщині стінки реактору. Відповідна тривалість режиму вирахована і складає 15000 сек.

Охолодження стінки змодельоване залежним від часу охолоджуючим потоком $q(t)$, Вт/м² по наступному закону:

$$q(t) = \begin{cases} 0 \leq t \leq 380; -97500; \\ 380 \leq t \leq 530; -97500 - \frac{1}{2}(60000 - 97500) \cdot (1 - \cos\left(\frac{\pi \cdot (t - 380)}{0,6 \cdot t - 168}\right)); \\ 530 \leq t \leq 1000; 42,553191 \cdot t - 82553,19; \\ 1000 \leq t \leq 2500; 13,333333 \cdot t - 53333,33; \\ 2500 \leq t \leq 6000; q(t) = 4,2857143 \cdot t - 30714,29; \\ 6000 \leq t \leq 15000; 0,5555556 \cdot t - 8333,333. \end{cases}$$

Даний закон відповідає графіку $q(t)$, приведеному на Малюнку Д.1. Йому в свою чергу відповідає закон зміни температури внутрішньої поверхні стінки КР під час режиму «22.10.85», приведений на Малюнку Д.2.

2) конструкційні матеріали і їх властивості.

Марки матеріалів зварного з'єднання № 3 прийнято з урахуванням даних Таблиць 5-7 звіту [Зв.1] згідно даних Додатку 1 Норм міцності [НД.1]. При виконанні даної розрахункової оцінки врахована залежність фізико-механічних властивостей матеріалів від температури.

Характеристики крихкої міцності основного матеріалу зварного з'єднання № 3 прийнято згідно публікації Інституту ядерних досліджень НАН України [Пб.5] і детально наведено в розділі Д.3 Аналізу.

3) розміри.

Товщина стінки КР на рівні зварного з'єднання № 3 дорівнює 200 мм.

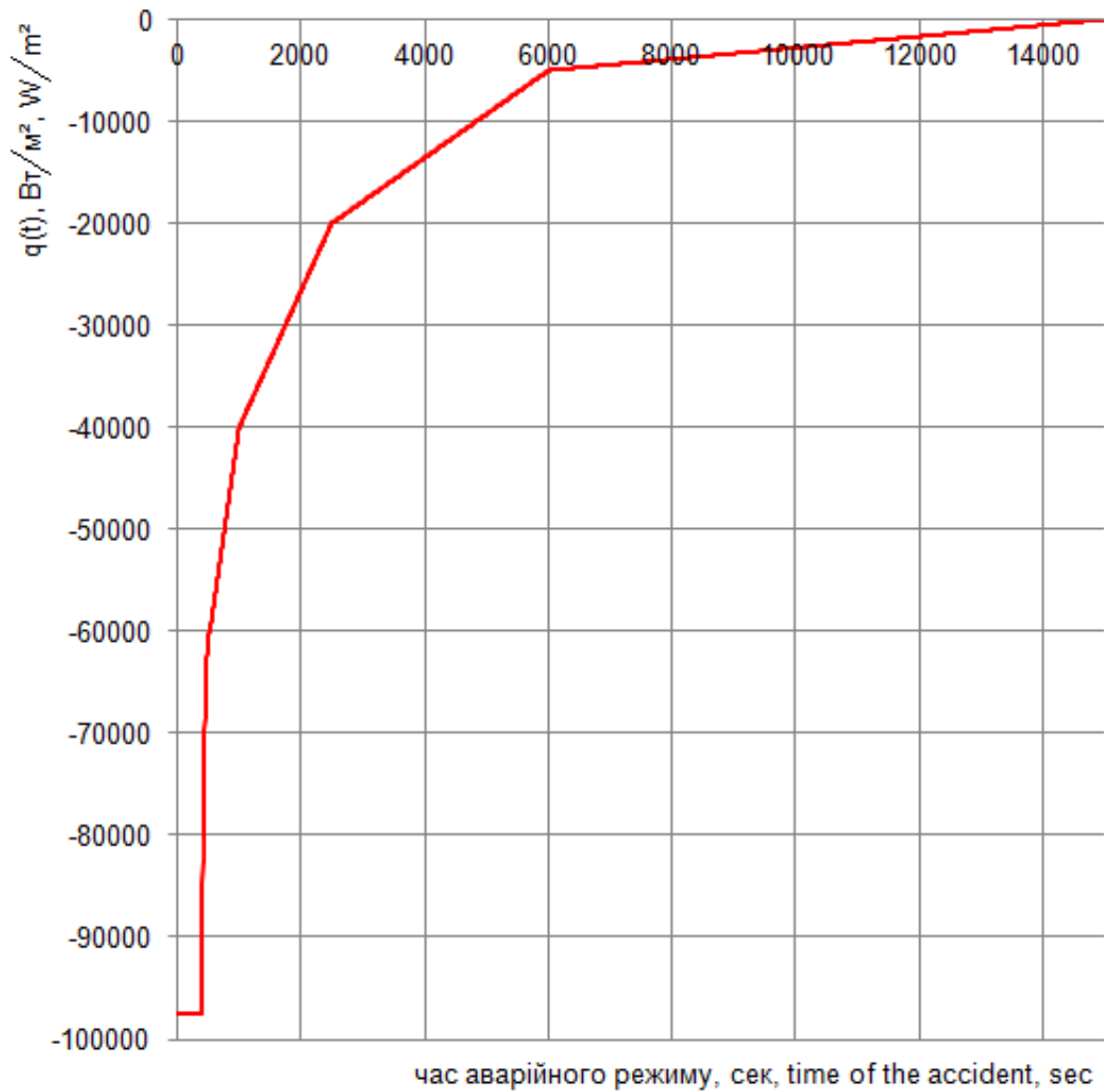
Товщина наплавлення – 9 мм.

Д.2 Оцінка циклічної міцності для зварного з'єднання № 3 КР блоку № 1 ВП ЮУАЕС для режимів НУЕ, ГВ та АС з урахуванням АС «22.10.85».

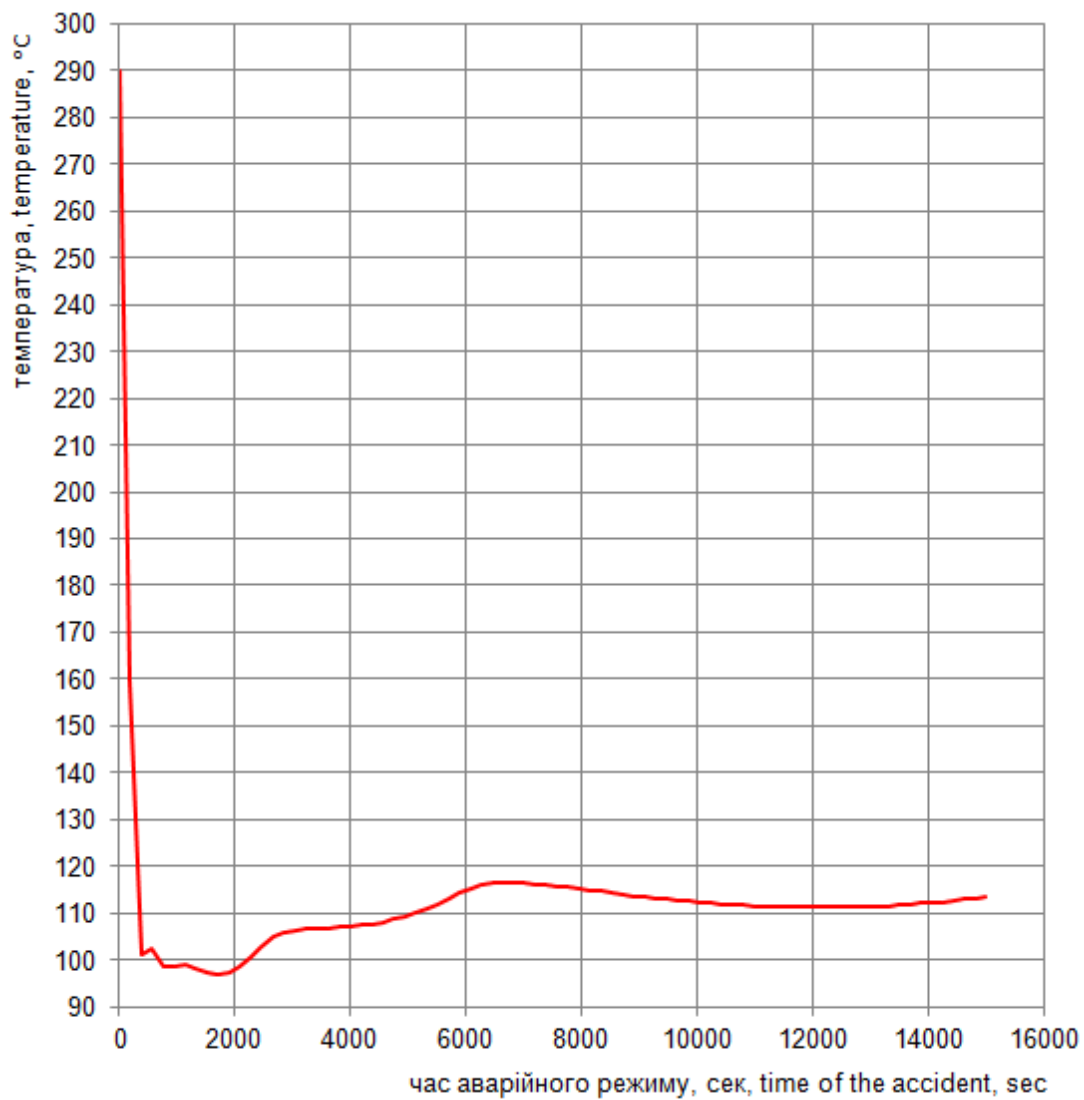
Розрахункова оцінка циклічної міцності виконана згідно вимог розділу 5.6 Норм міцності [НД.1] з метою уточнення результатів звіту [Зв.1] (з урахуванням АС «22.10.85») та визначення зсуву критичної температури крихкості ΔT_N (пункт Д.3 Аналізу).

Приведені напруги (σ_L) та умовні пружні приведені напруги (σ_F) визначені згідно вимог розділу 5.3 Норм міцності [НД.1]. Тому для визначення приведених напруг необхідне було визначення трьох головних напружень. Крім того, враховуючи, що 95,5% товщини стінки займає основний метал і лише 4,5% – наплавлення, для визначення напруженого стану металу стінки КР на рівні зварного з'єднання № 3 використані нормативні формули Таблиці ПЗ.17 Додатку 3 [НД.1] для одношарового товстостінного циліндру, а саме – для розрахунку радіальних σ_r , кільцевих σ_θ та осьових σ_z напружень.

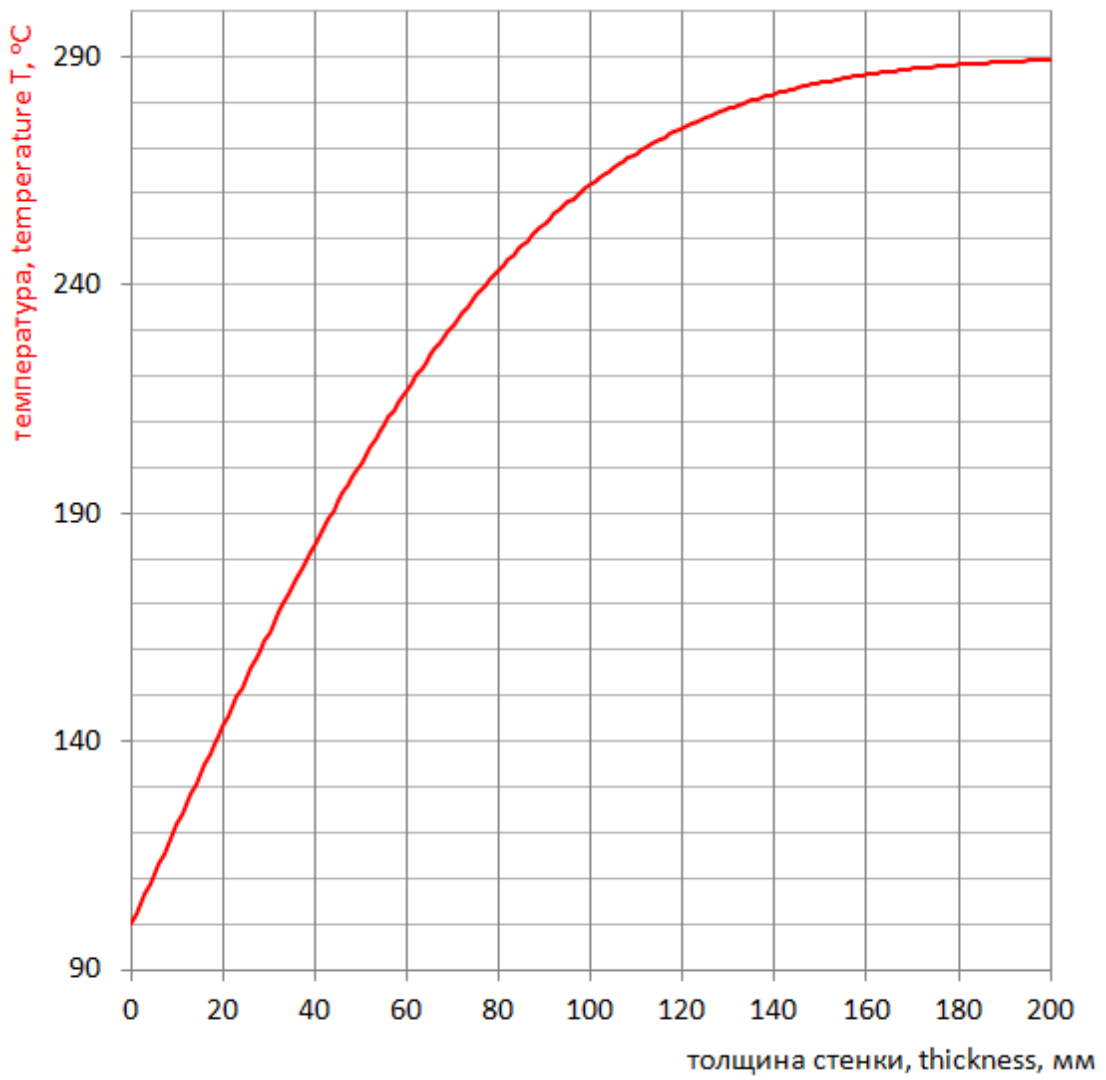
Найбільші температурні напруження при режимі «22.10.85» мають місце в момент найбільшого температурного градієнту в стінці КР. Згідно прийнятим параметрам навантаження, цей момент часу – 380 сек. Відповідний графік температури в стінці КР, одержаний згідно посібнику [Пб.4] із застосуванням методу кінцевих різниць з прогінними коефіцієнтами, наведено на Малюнку Д.3.



Малюнок Д.1. Графік потоку $q(t)$, W/m^2 , прийнятий для охолодження внутрішньої поверхні стінки КР при режимі «22.10.85».



Малюнок Д.2. Графік температури внутрішньої поверхні стінки КР при режимі «22.10.85» $T(t)^{\circ}\text{C}$, що відповідає прийнятому в Аналізі охолоджуючому потоку $q(t)$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.



Малюнок Д.3. Графік температури $T(t)^\circ\text{C}$ через стінку КР на 380-й сек режиму «22.10.85».

1) блок режимів НУЕ→АС «22.10.85».

Розрахунок пошкоджуваності виконано для блоку навантажень «НУЕ→АС «22.10.85»» з кроком по товщині стінки через 1 мм. Відповідні результати розрахунку циклічної пошкоджуваності для типових глибин, що характеризують графік пошкоджуваності по товщині, наведено в розділі Б.1 Додатку Б Аналізу. Такий графік наведено на Малюнку Д.4.

2) блок режимів НУЕ→ГВ.

Розрахунок пошкоджуваності виконано для блоку навантажень «НУЕ→ГВ» з кроком по товщині стінки також через 1 мм. Відповідні результати розрахунку циклічної пошкоджуваності для типових глибин, що характеризують графік пошкоджуваності по товщині, наведено в розділі Б.2 Додатку Б Аналізу. Відповідний графік для одного блоку навантажень «НУЕ→ГВ» наведено на Малюнку Д.5.

3) блоки режимів $N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»})$.

Згідно розділу 5.6 Норм міцності [НД.1], сумарна пошкоджуваність a в даному випадку дорівнює (включаючи останній доданок, що в звіті [Зв.1] не враховано):

$$a = \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}}} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}}$$

Даний вираз відповідає нормативній формулі сумування циклічних пошкоджуваностей при дії декількох режимів, приведений в пункті 2.6 Аналізу.

Циклічна пошкоджуваність металу КР на рівні зварного з'єднання № 3 відповідає наступним блокам навантаження КР, коли його напрацювання N дорівнює 30, 40 і 60 циклів/років:

для 30 років: $30 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + 30 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + 30 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»})$;

для 40 років: $40 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + 40 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + 40 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»})$;

для 60 років: $60 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}) + 60 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + 60 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}) + 1 \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС} \text{ «22.10.85»})$.

Оскільки в межах даного Аналізу визначити циклічну пошкоджуваність для блоків $N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{ПНУЕ}) + N \cdot (\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС})$ ускладнено, вона оцінена двома підходами, які дозволили окремо розглянути режими НУЕ, ГИ і АС:

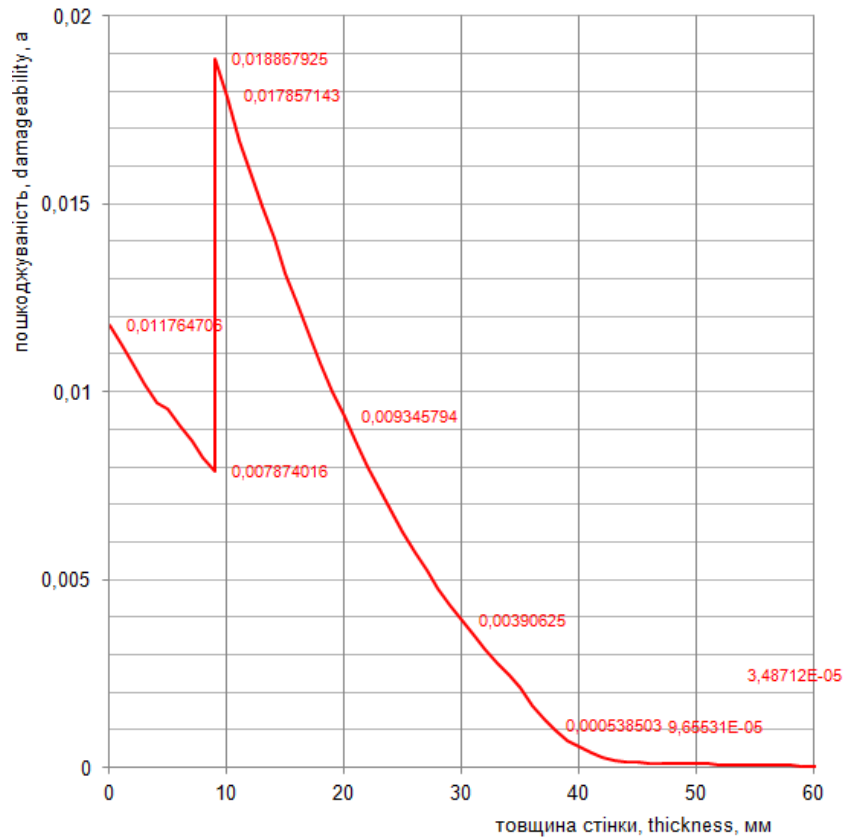
$$a_{1\text{тихид}} = a_{\text{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}} = a_{\text{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} + a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}^{\text{Аналіз}};$$

$$a_{2\text{тихид}} = \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}} + a_{\text{ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} + \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}} = a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Аналіз}} + a_{\text{ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} + a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{АС}} \text{ «22.10.85»}^{\text{Аналіз}};$$

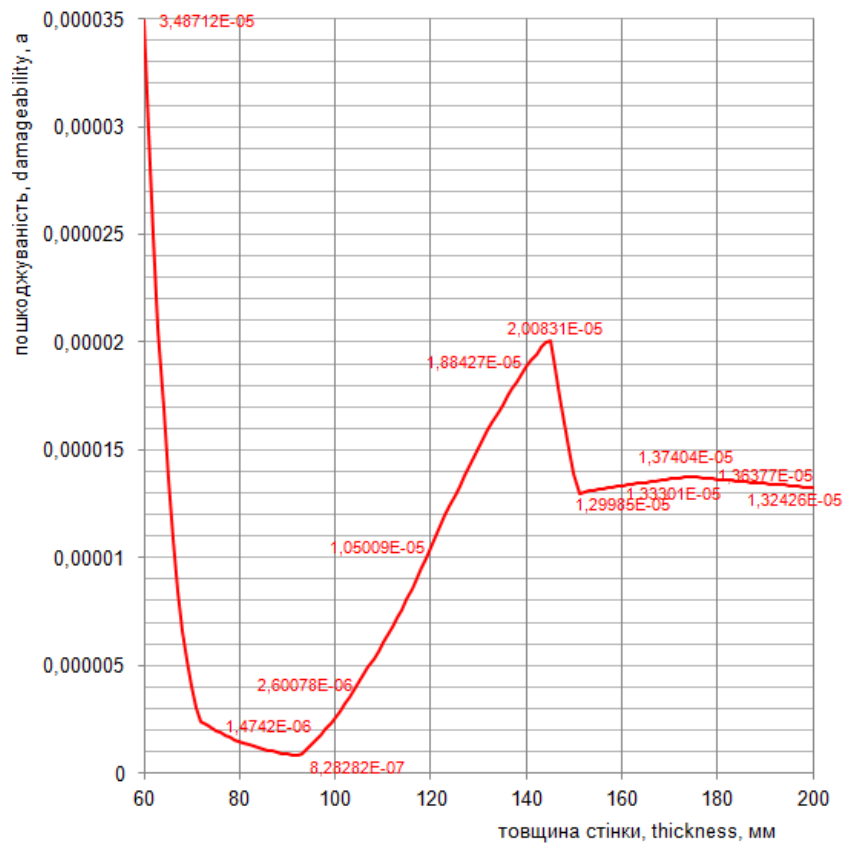
$$\text{де: } a_{\text{ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} = a_{\text{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} - \frac{N_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}}{[N_0]_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}} = a_{\text{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}}^{[3\text{в.1}]} - a_{\text{НУЕ} \rightarrow \text{ГВ}}^{\text{Аналіз}}$$

Відповідні результати оцінки надані в Таблицях Д.1.1 (30 років експлуатації), 2.2 (40 років експлуатації) та 2.3 (60 років експлуатації) Аналізу.

а)



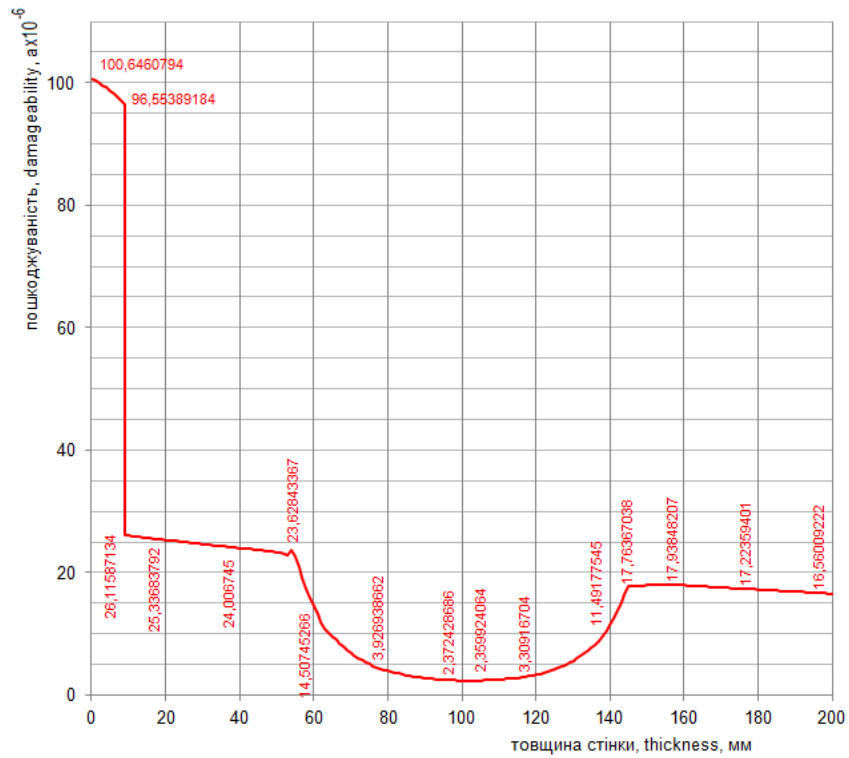
б)



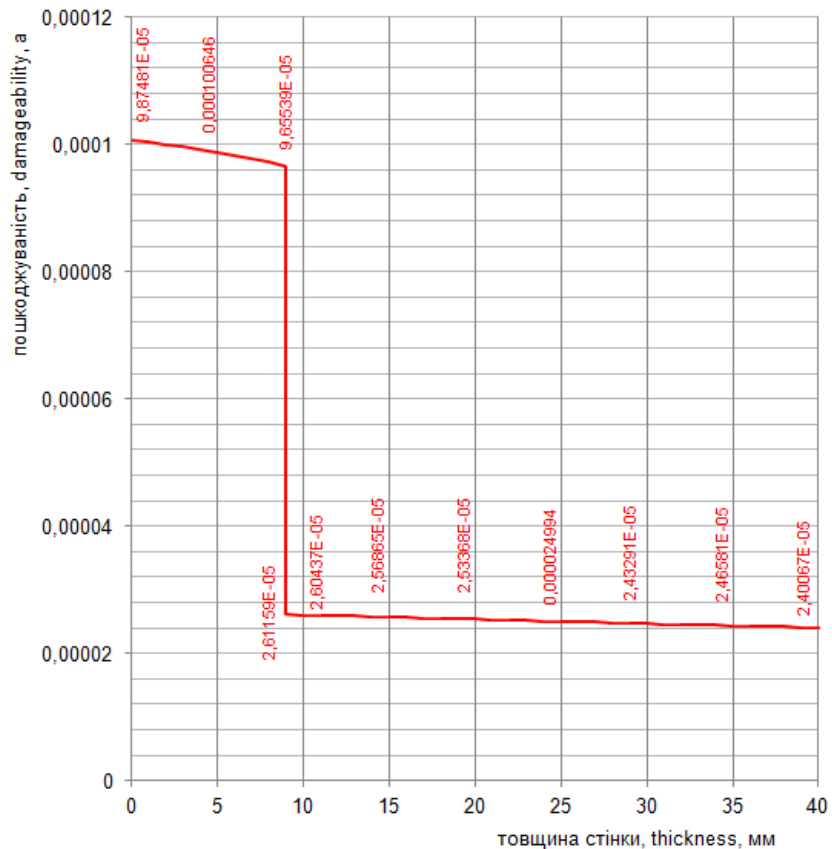
Малюнок Д.4. Циклічна пошкоджуваність для блоку навантажень «НУЕ→АС «22.10.85»» на рівні зварного з'єднання № 3 КР:

- а) для товщини від 0 мм до 60 мм;
- б) для товщини від 60 мм до 200 мм.

а)



б)



Малюнок Д.5. Циклічна пошкоджуваність для одного блоку навантажень «НУЕ→ГВ» на рівні зварного з'єднання № 3 КР:

- а) для всієї товщини стінки;
- б) для товщини від 0 мм до 40 мм.

Таблиця Д.1.1. Результати оцінки циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР для точок 9а, 9б та 9с (Таблиці 5-7 [Зв.1]) для терміну експлуатації 30 років.

Точки згідно таблиць 5-7 [Зв.1]	Тривалість експлуатації КР				
	30				
9а	$a^{[Зв.1]}_{HVE, GB, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Таблиця А.52 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,012	-	0,011764706	0,023764706
	min	0,011	-	0,011764706	0,022764706
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow GB}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Малюнок Б.29 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,00301938	0,00898062	0,011764706	0,023764706
	min		0,00798062		0,022764706
9б	$a^{[Зв.1]}_{HVE, GB, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Таблиця А.53 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,005	-	0,018867925	0,023867925
	min	0,005	-	0,018867925	0,023867925
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow GB}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Малюнок Б.31 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,000783477	0,004216523	0,018867925	0,023867925
	min		0,004216523		0,023867925
9с	$a^{[Зв.1]}_{HVE, GB, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Таблиця А.54 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,002	-	0,000013243	0,002013243
	min	0,002	-	0,000013243	0,002013243
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow GB}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \sum a_i$	
	Малюнок Б.44 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,000496803	0,001503197	0,000013243	0,002013243
	min		0,001503197		0,002013243

Таблиця Д.1.2. Результати оцінки циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР для точок 9а, 9б та 9с (Таблиці 5-7 [Зв.1]) для терміну експлуатації 40 років.

Точки згідно таблиць 5-7 [Зв.1]	Тривалість експлуатації КР				
	40				
9а	$a^{[Зв.1]}_{HVE, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця А.52 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,019	-	0,011764706	0,030764706
	min	0,018	-	0,011764706	0,029764706
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.29 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,00402584	0,01497416	0,011764706	0,030764706
	min		0,01397416		0,029764706
9б	$a^{[Зв.1]}_{HVE, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця А.53 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,009	-	0,018867925	0,027867925
	min	0,008	-	0,018867925	0,026867925
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.31 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,001044636	0,00795536	0,018867925	0,027867925
	min		0,00695536		0,026867925
9с	$a^{[Зв.1]}_{HVE, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця А.54 Аналізу по Таблицям 5-7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,004	-	0,000013243	0,004013243
	min	0,004	-	0,000013243	0,004013243
	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{HVE \rightarrow АС} "22.10.85"$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.44 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,000662404	0,003337596	0,000013243	0,004013243
	min		0,003337596		0,004013243

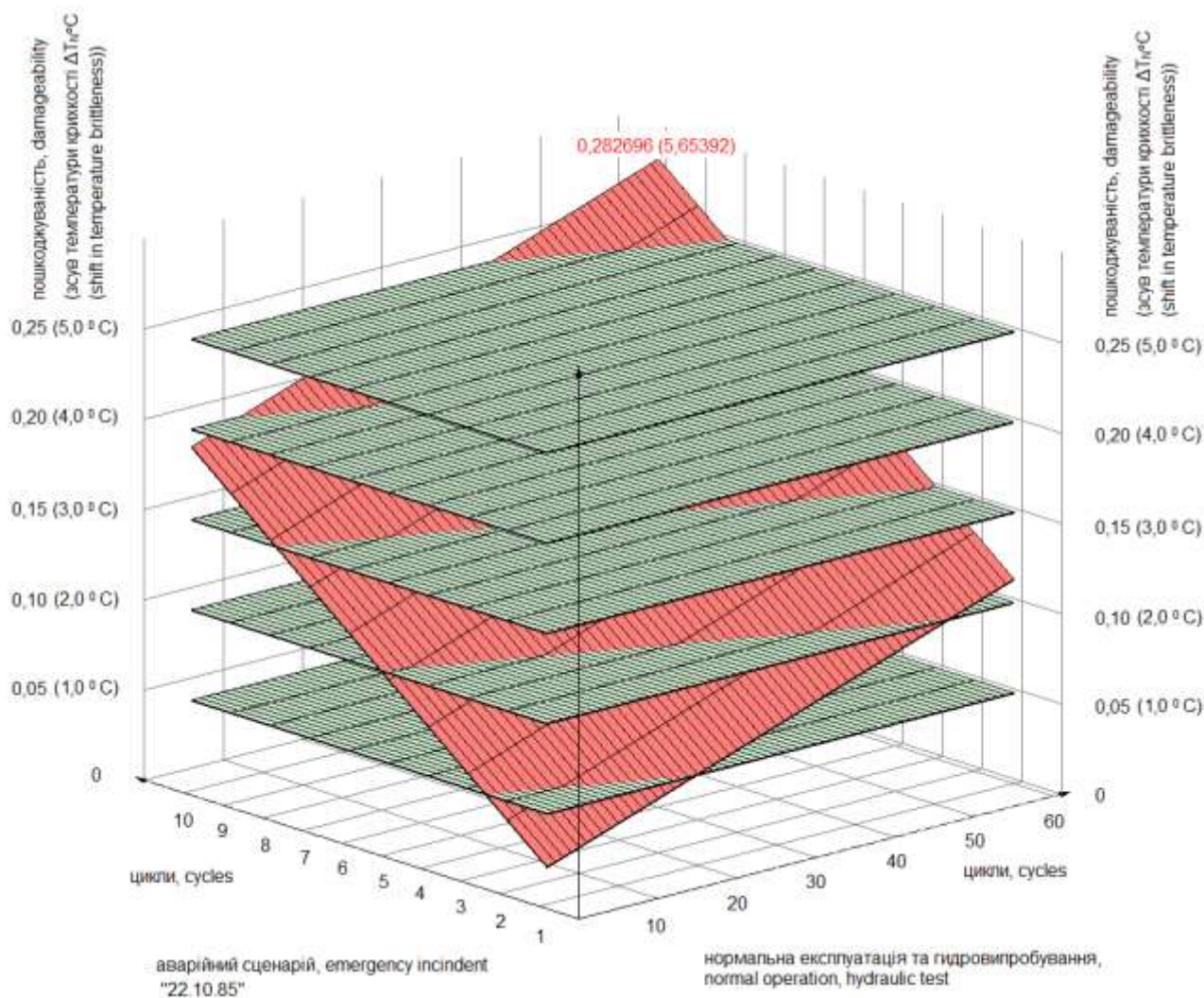
Таблиця Д.1.3. Результати оцінки циклічної пошкоджуваності металу зварного з'єднання № 3 КР для точок 9а, 9б та 9с (Таблиці 5-7 [Зв.1]) для терміну експлуатації 60 років.

Точки згідно таблиць 5-7 [Зв.1]	Тривалість експлуатації КР				
	60				
9а	$a^{[Зв.1]}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця 5 [Зв.1]	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,031283	-	0,011764706	0,043047706
	min				
	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.29 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.5 Аналізу	-	
	max	0,00603876	0,02524424	0,011764706	0,043047706
min					
9б	$a^{[Зв.1]}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця 6 [Зв.1]	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,014249	-	0,018867925	0,033116925
	min				
	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.31 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.7 Аналізу	-	
	max	0,001566954	0,012682	0,018867925	0,033116925
min					
9с	$a^{[Зв.1]}_{НУЕ, ГВ, ПНУЕ, АС}$	-	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_1 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Таблиця 7 [Зв.1]	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,006469	-	0,000013243	0,006482243
	min				
	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow ГВ}$	$a^{[Зв.1]}_{ПНУЕ, АС}$	$a^{Аналіз}_{НУЕ \rightarrow АС "22.10.85"}$	$a_2 \text{ підхід} = \Sigma a_i$	
	Малюнок Б.44 Аналізу з урахуванням напрацювання КР	-	Малюнок Б.24 Аналізу	-	
	max	0,000993606	0,005475	0,000013243	0,006482243
min					

Отже, порівняльний аналіз даних останнього та передостаннього стовпчиків результуючих Таблиць Д.1.1, Д.1.2 та Д.1.3 демонструє, що, можливо, неврахований в звіті [Зв.1] аварійний режим «22.10.85», зокрема, в піднаплавочній зоні зварного з'єднання № 3 КР (згідно позначці [Зв.1] точка 9б) становить значну частину – 79%,

70% та 57% від загальної пошкодженості, відповідно, для 30, 40 та 60 років експлуатації КР.

А отже і вплив на зростання циклічної пошкодженості та на зсув температури ΔT_N можливих повторів аварійного режиму «22.10.85» разом з реалізацією проектних режимів НУЕ та ГВ занадто значний, що продемонстровано на Малюнку Д.6 (за результатами оцінки, викладеними в Додатку Б Аналізу).



Малюнок Д.6. Загальний вплив на зростання циклічної пошкодженості (та на зсув температури ΔT_N) режимів НУЕ, ГВ та АС «22.10.85».

Д.3 Оцінка опору крихкому руйнуванню та ресурсу КР блоку № 1 ВП ЮУАЕС для режиму «22.10.85» для зварного з'єднання № 3.

Розрахункова оцінка опору крихкому руйнуванню виконана згідно вимог розділу 5.8 Норм міцності [НД.1].

Сценарій зміни температури в стінці КР визначено розв'язанням задачі нестационарної теплопровідності методом кінцевих різниць з прогінними коефіцієнтами згідно посібнику [Пб.4]. Для оцінки крихкої міцності при наявності кільцевої (осьової) тріщини використані нормативні формули розрахунку осьових (кільцевих) напружень σ_z (σ_θ) для двошарового товстостінного циліндру Таблиці ПЗ.18 Додатку 3 [НД.1]. Відповідні результати для АС «22.10.85» надані в Додатку В.

Основна характеристика матеріалу зварного з'єднання № 3 КР блоку № 1 ВП ЮУАЕС – критична температура крихкості T_k – визначається згідно пункту 5.8.4.1 Норм міцності [НД.1]. Її вирішальні складові T_{k0} , ΔT_F , ΔT_N визначаються з урахуванням наступного:

- зсув критичної температури крихкості від циклічних навантажень ΔT_N визначено згідно пункту 5.8.4.4 Норм міцності [НД.1] по формулі

$$\Delta T_N = 20 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{[N_0]_i};$$

де N_i - число циклів навантаження при i -му режимі експлуатації;
 $[N_0]_i$ - число циклів, що допускається, для i -го режиму експлуатації;
 m - число режимів.

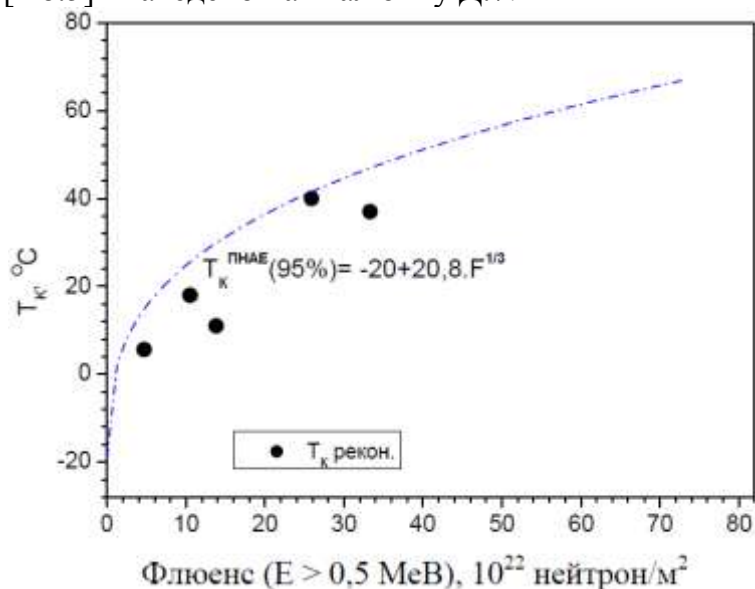
- зсув критичної температури крихкості від впливу іонізуючого випромінювання ΔT_F визначено згідно пункту 5.8.4.5 [НД.1] по формулі

$$\Delta T_F = A_F \cdot F^{\frac{1}{3}};$$

де A_F - коефіцієнт радіаційного окрихнення °С;

F - перенос нейтронів з енергією $\geq 0,5$ МеВ, зменшений в $10^{22} \frac{\text{нейтронів}}{\text{м}^2}$.

- згідно даних публікації ІЯД НАНУ [Пб.5], враховано, що початкова температура $T_{k0} = -20^\circ\text{C}$, коефіцієнт радіаційного окрихнення $A_F = 20,8^\circ\text{C}$. Закон зміни критичної температури крихкості від впливу іонізуючого випромінювання також відповідає [Пб.5] і наведено на Малюнку Д.7.



Малюнок Д.7. Графік залежності $T_k(F)$ для зварного з'єднання № 3 КР блоку № 1 ВП ЮУАЕС, наведений в публікації [Пб.5], і врахований при оцінці крихкої міцності і ресурсу КР.

При виконанні незалежної оцінки крихкої міцності і ресурсу КР розглянуто набір кільцевих (9 дефектів) та осьових (9 дефектів) постульованих тріщин з наступними параметрами:

- глибина a : 30 мм, 40 мм та 50 мм;
- відношення глибини до напівдовжини $\frac{a}{c}$: 0,2, 0,6 та 1,0,

що знаходиться в нормативних межах, наведених в пункті 5.8.5.2 та в позиції 4 пункту 5.8.7.2 Норм міцності [НД.1], а також в пункті 6.3 рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2].

Розрахункова оцінка виконана двома методами згідно:

- розділу 5.8, зокрема – пункту 5.8.7.2 Норм міцності [НД.1];
- розділу 7, зокрема – пункту 7.3 рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2].

Коефіцієнт інтенсивності напружень першого роду K_I розраховано методом вагових функцій згідно [Пб.3].

Результати оцінки за обома методами для кільцевих тріщин наведено в розділі Г.1, для осьових – в розділі Г.2 Додатку Г Аналізу. При оцінці ресурсу на графіках $T_k(t, \text{років}), ^\circ\text{C}$ враховано, що:

- напрацювання реактору блоку № 1 ВП ЮУАЕС, визначене в роках, на 2 (два) більше, ніж розраховане в паливних кампаніях;
- має місце додатковий зсув критичної температури крихкості ΔT_N від блоків режимів НУЕ→ГВ (по одному в рік) та АС «22.10.85» (один за весь період експлуатації КР).

Результати, що представлені в Додатку Г, зведені в Таблицю Д.2.

Найгірший результат для розглянутого набору постульованих кільцевих тріщин відповідає кільцевій тріщині глибиною $a = 30$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Для неї ресурс КР дорівнює 5,59 років.

Найгірший результат для розглянутого набору постульованих осьових тріщин відповідає осьовій тріщині глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Для неї ресурс КР дорівнює 2,91 років.

Обидва найгірших випадки позначені в Таблиці Д.2 темним штрихуванням. Останній з них визначає ресурс реактору для аварійного режиму «22.10.85».

Результати розрахунку опору крихкому руйнуванню КР згідно критерію 2.7 (розділ 2 Аналізу) для вказаного критичного випадку (осьова тріщина глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$), представлені:

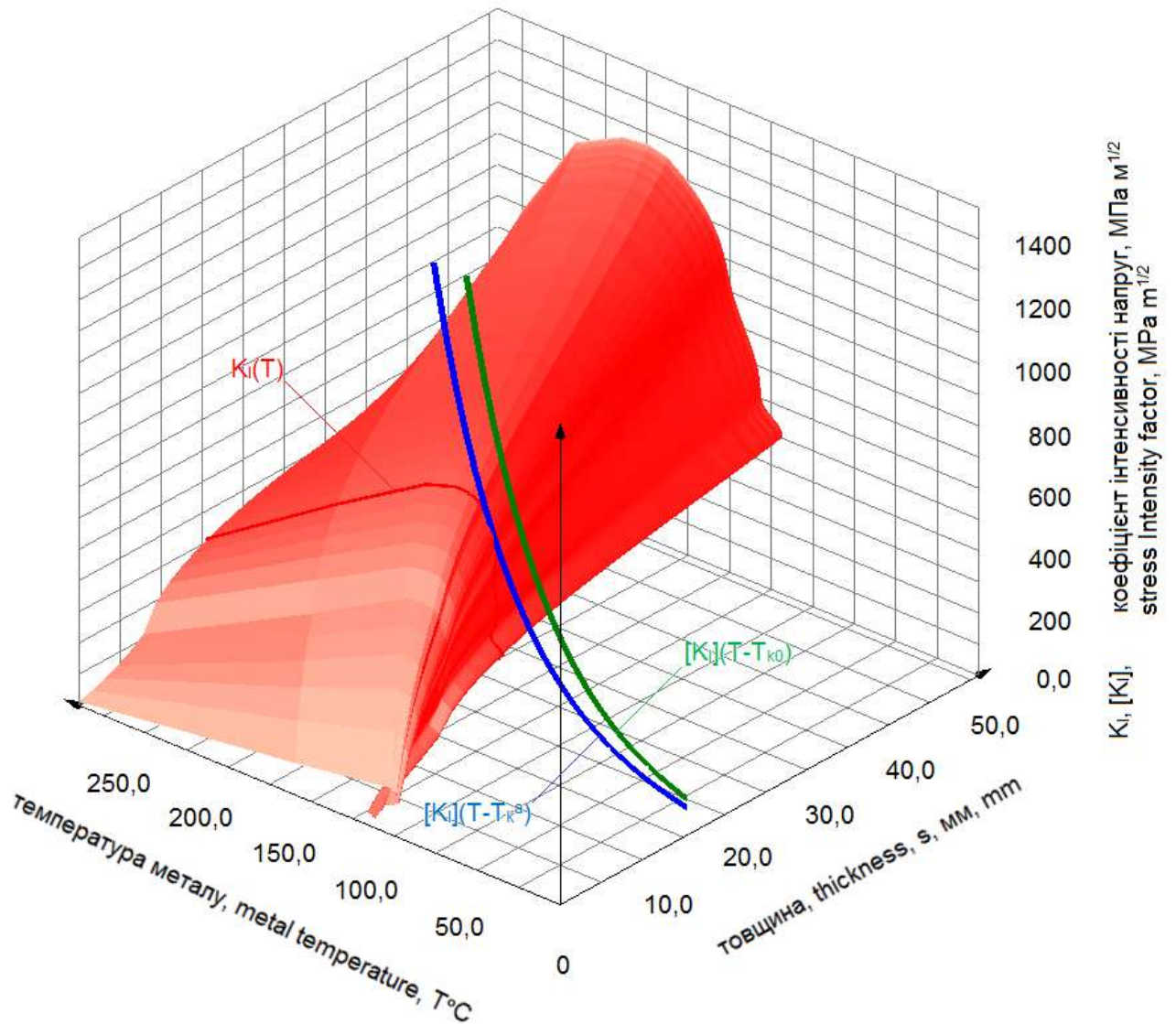
- на Малюнках 9 та 10 – одержані згідно рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2];
- на Малюнках 11 та 12 – одержані згідно Норм міцності [НД.1].

Результат оцінки ресурсу/терміну експлуатації КР – 2,91 року – для вказаного критичного випадку наведено на Малюнку 13.

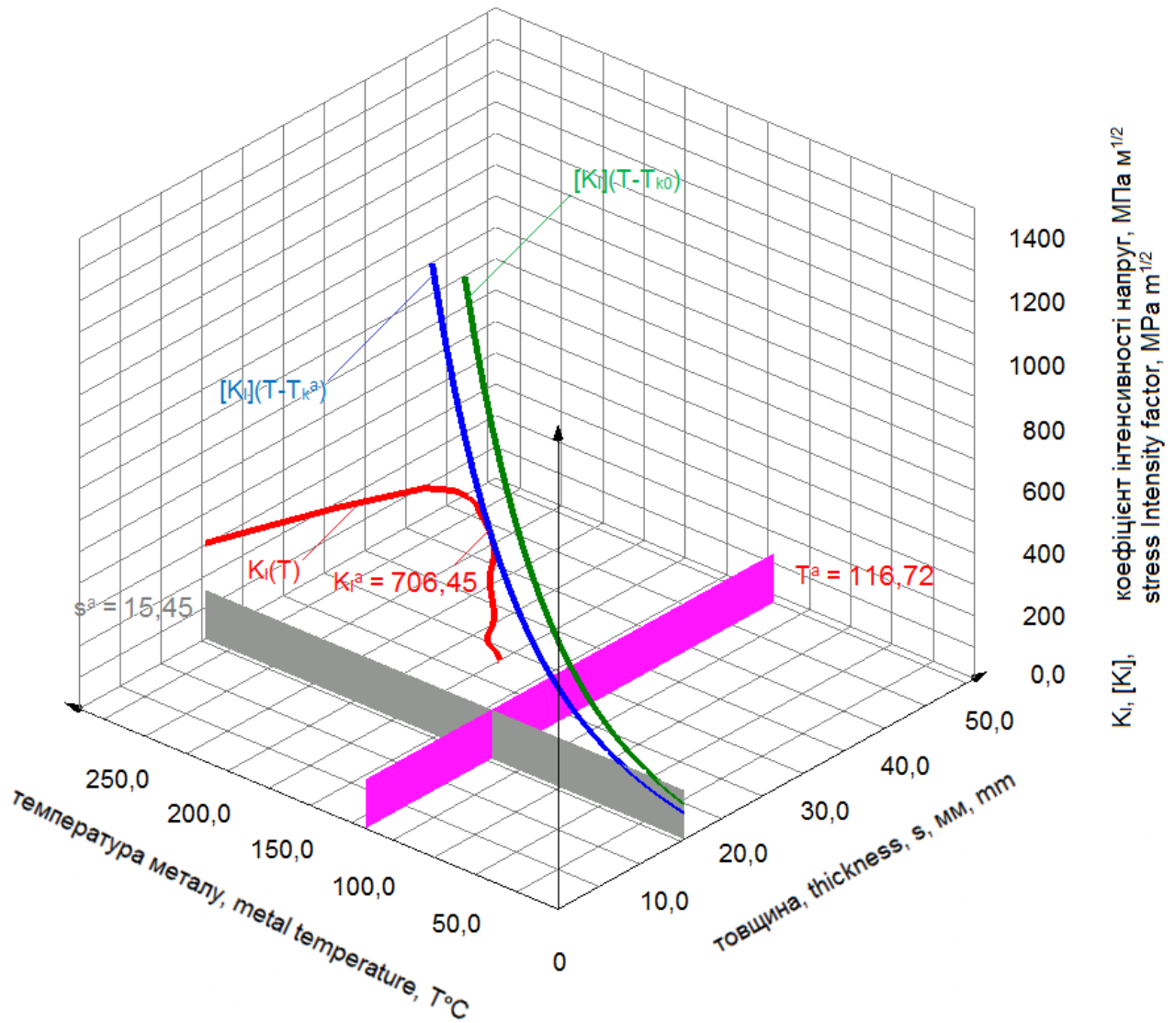
Вказаний ресурс КР вичерпано на глибині металу 15,45 мм при його температурі 116,72°C на 1710 сек аварійного режиму «22.10.85».

Таблиця Д.2. Результати оцінки ресурсу КР блоку № 1 ВП ЮУАЕС для зварного з'єднання № 3 по результатам розрахунку опору крихкому руйнуванню для аварійного режиму «22.10.85».

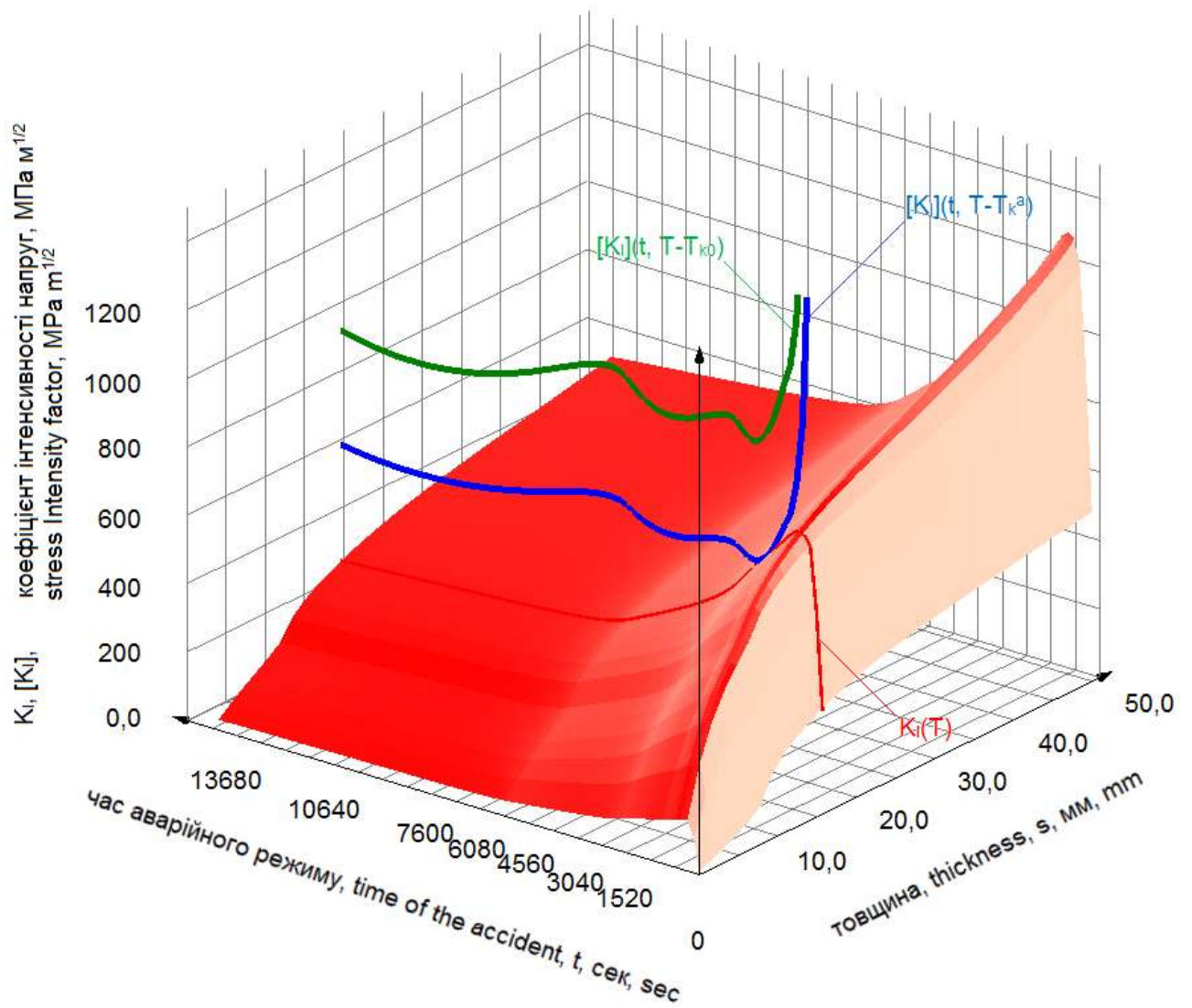
№	Співвідношення глибини до напівдовжини а/с	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,6	1	1	1
	Глибина а, мм	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Кільцева тріщина										
1	Прогнозований ресурс/строк безпечної експлуатації КР, років	5,59	5,65	5,65	18,18	18,31	18,53	47,68	47,27	47,12
	Критична температура крихкості аварійна, що визначає ресурс КР T_k^a , °С	11,41	11,65	11,61	31,63	31,81	32,11	52,87	52,71	52,71
	Момент часу розвитку АС $t(T^a)$, сек	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520
	Температура металу КР на ресурсній глибині T^a , °С	117,09	115,85	116,40	118,21	117,46	116,40	118,21	117,46	116,40
	Коефіцієнт інтенсивності напружень першого роду, що визначає ресурс КР K_I^a , МПа×м ^{1/2}	560,03	543,56	550,07	381,87	374,99	365,13	253,79	251,02	246,11
	Глибина металу, на якій вичерпується ресурс КР, мм	14,45	13,55	13,95	15,27	14,72	13,95	15,27	14,72	13,95
Осьова тріщина										
2	Прогнозований ресурс/строк безпечної експлуатації КР, років	3,38	3,14	2,91	9,99	10,43	10,85	25,63	26,25	26,71
	Критична температура крихкості аварійна, що визначає ресурс КР T_k^a , °С	2,83	1,50	-0,33	20,81	21,55	22,25	38,47	38,99	39,40
	Момент часу розвитку АС $t(T^a)$, сек	1710	1710	1710	1710	1710	1710	1710	1710	1710
	Температура металу КР на ресурсній глибині T^a , °С	117,52	115,80	116,72	117,52	117,28	116,72	117,52	117,28	116,72
	Коефіцієнт інтенсивності напружень першого роду, що визначає ресурс КР K_I^a , МПа×м ^{1/2}	672,97	667,68	706,45	467,16	457,92	446,65	329,55	324,73	318,74
	Глибина металу, на якій вичерпується ресурс КР, мм	16,07	14,72	15,45	16,07	15,89	15,45	16,07	15,89	15,45



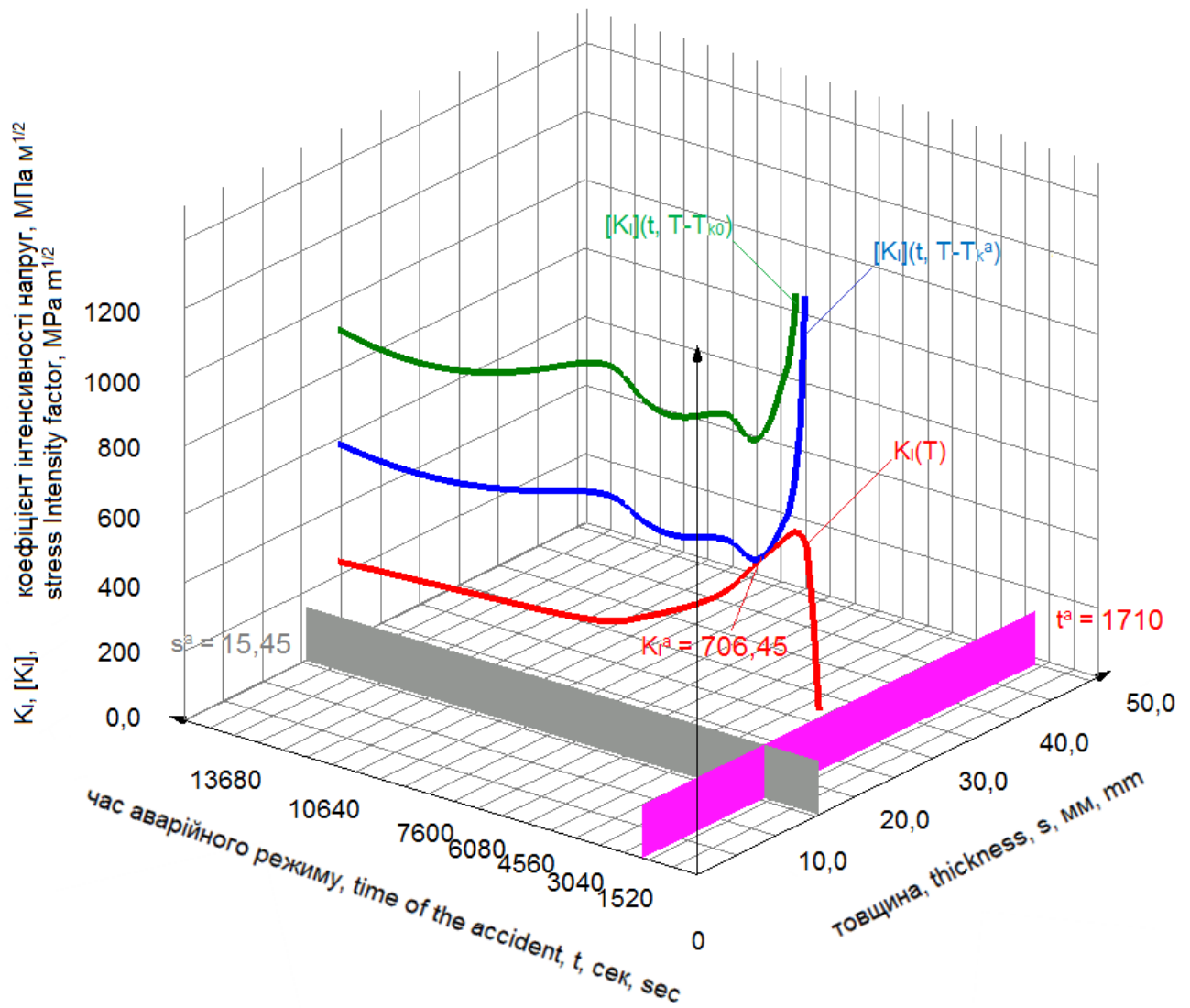
Малюнок Д.8. Оцінка опору крихкому руйнуванню КР на рівні зварного з'єднання № 3 згідно рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2] для аварійного режиму «22.10.85» для осьової тріщини глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Критична поверхня $K_I(T^\circ\text{C}, s, \text{мм}) \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Зелена та синя криві – початковий та граничний стани металу на глибині 15,45 мм $[K_I](T^\circ\text{C}) \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.



Малюнок Д.9. Оцінка опору крихкому руйнуванню КР на рівні зварного з'єднання № 3 згідно рекомендацій МАГАТЕ [Рк.2] для аварійного режиму «22.10.85» для осової тріщини глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Критична крива $K_I(T^{\circ}\text{C})$ МПа·м^{1/2}. Зелена та синя криві – початковий та граничний стани металу на глибині 15,45 мм $[K_I](T^{\circ}\text{C})$ МПа·м^{1/2}.



Малюнок Д.10. Оцінка опору крихкому руйнуванню КР на рівні зварного з'єднання № 3 згідно Норм міцності [НД.1] для аварійного режиму «22.10.85» для осьової тріщини глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/s = 0,2$. Критична поверхня $K_I(t, \text{сек}, s, \text{мм}) \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Зелена та синя криві – початковий та граничний стани металу на глибині 15,45 мм $[K_I](t, \text{сек}) \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$.



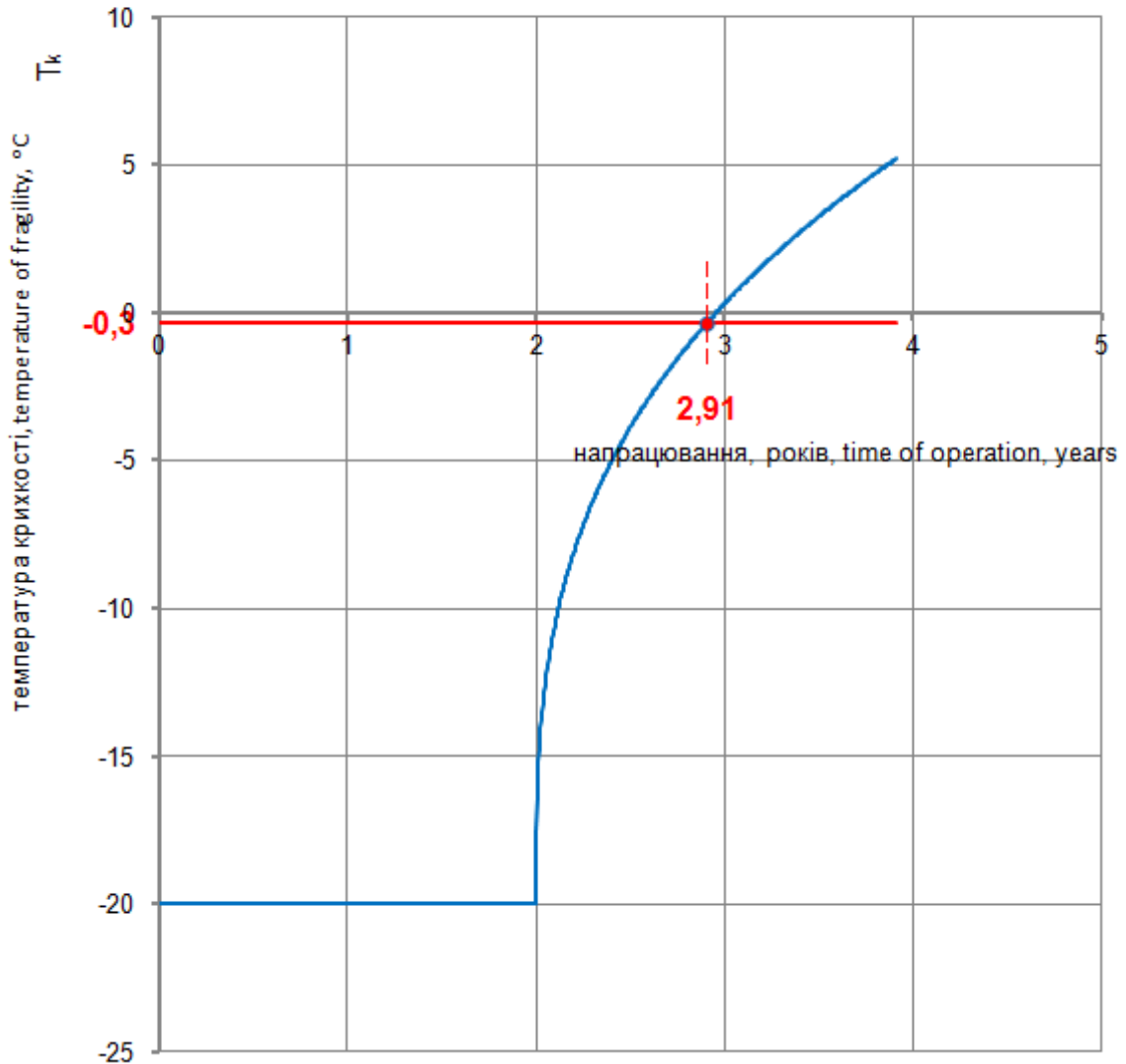
Малюнок Д.11. Оцінка опору крихкому руйнуванню КР на рівні зварного з'єднання № 3 згідно Норм міцності [НД.1] для аварійного режиму «22.10.85» для осьової тріщини глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Критична крива $K_I(t, \text{сек})$ МПа·м^{1/2}. Зелена та синя криві – початковий та граничний стани металу на глибині 15,45 мм $[K_I](t, \text{сек})$ МПа·м^{1/2}.

Прогноз ресурсу для глибини металу 15,45 мм: 2,91 років.

A prognosis of lifetime for the depth of metal 15,45 mm: 2,91 years.

Параметри тріщини $a/c = 0,2$. Глибина тріщини $a = 50$ мм. Осьова тріщина.

Parameters of crack $a/c = 0,2$. Depth of crack $a = 50$ mm. Axial crack.



Малюнок Д.12. Оцінка ресурсу/терміну експлуатації КР на рівні зварного з'єднання № 3 для осьової тріщини глибиною $a = 50$ мм з відношенням $a/c = 0,2$. Графік $T_k(F, N)$, °C. Стан металу на глибині 15,45 мм відповідає вичерпанню ресурсу КР через 2,91 року від початку експлуатації для аварійного режиму «22.10.85».

Д.4 Нижче виконана розрахункова перевірка можливого негативного впливу режиму «22.10.85» на крихку міцність металу реактору з урахуванням наступних даних та умов для зварного з'єднання № 3:

- критична температура крихкості T_k згідно змісту пункту 4.3.6 звіту [Зв.3] з урахуванням складових T_{k0} , ΔT_F дорівнює

$$T_k(F) = T_{k0} + \Delta T_F;$$

- критична температура крихкості T_k згідно пункту 5.8.4.1 Норм міцності [НД.1] з урахуванням складових T_{k0} , ΔT_F , ΔT_N повинна дорівнювати

$$T_k(F, a) = T_{k0} + \Delta T_F + \Delta T_N;$$

- зсув критичної температури крихкості ΔT_F від впливу іонізуючого випромінювання F згідно пункту 5.8.4.5 [НД.1] дорівнює

$$\Delta T_F = A_F \cdot F^{\frac{1}{3}};$$

де A_F - коефіцієнт радіаційного окрихнення °С;

F - перенос нейтронів з енергією $\geq 0,5$ МеВ, зменшений в $10^{22} \frac{\text{нейтронів}}{\text{м}^2}$.

- зсув критичної температури крихкості від циклічних навантажень ΔT_N визначається згідно пункту 5.8.4.4 Норм міцності [НД.1] по формулі

$$\Delta T_N = 20 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{N_i}{[N_0]_i};$$

де N_i - число циклів навантаження при i -му режимі експлуатації;

$[N_0]_i$ - число циклів, що допускається для i -го режиму експлуатації;

m - число режимів.

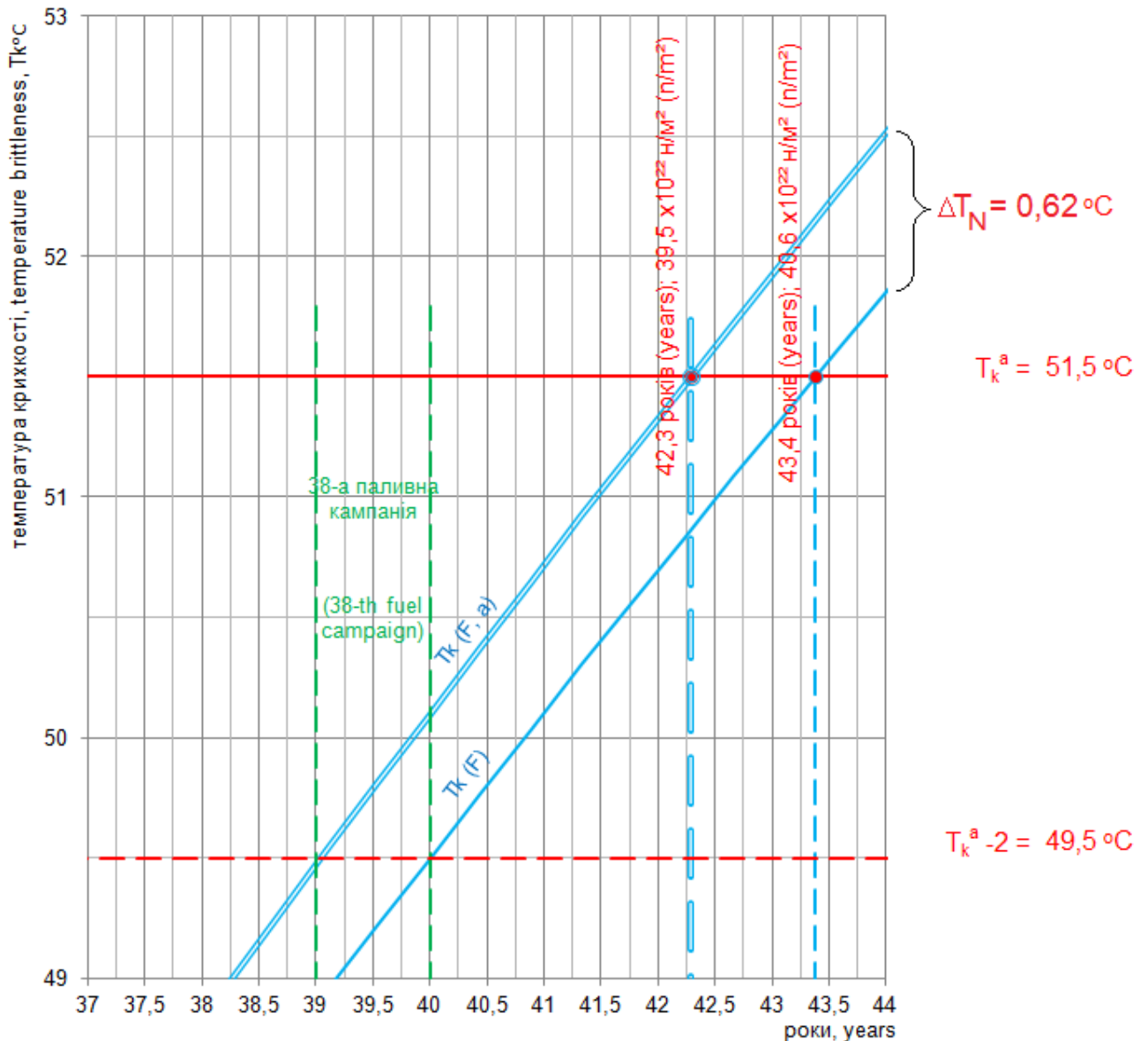
- згідно публікації ІЯД НАНУ [Пб.5], початкова температура $T_{k0} = -20^\circ\text{C}$, коефіцієнт радіаційного окрихнення $A_F = 20,8^\circ\text{C}$;

- згідно пункту 4.3.6 звіту [Зв.3], на кінець 38-ї паливної кампанії (40-й рік експлуатації) запас на виконання умов крихкої міцності по критичній температурі крихкості (умова виглядає як $T_k < T_k^a$) для режиму «OTHER 1.2» для зварювального з'єднання № 3 дорівнює $2,0^\circ\text{C}$ для радіаційного напрацювання $37,3 \times 10^{18} \left(\frac{\text{нейтронів}}{\text{см}^2} \right)$.

За результатами розрахункової оцінки можливого впливу режиму «22.10.85» разом з іншими режимами на зсув критичної температури крихкості з урахуванням зсуву ΔT_N від втомної пошкоджуваності з'ясовано наступне (Малюнок Д.13):

1) аварійна критична температура крихкості T_k^a для режиму «OTHER 1.2» ймовірно дорівнює $51,5^\circ\text{C}$ (в звіті ДНТЦ ЯРБ [Зв.3] не вказана). Температура T_k з запасом $2,0^\circ\text{C}$ дорівнює $49,5^\circ\text{C}$;

2) врахування зсуву $\Delta T_N = 20^\circ\text{C} \times a = 20 \times 0,0308 = 0,62^\circ\text{C}$ від циклічних навантажень (Таблиця Д.1.2) зменшує прогнозне значення ресурсу/строку служби реактору на $1,1 = 43,4 - 42,3$ (років).



Малюнок Д.13. Вплив на визначення ресурсу КР врахування циклічної пошкоджуваності $a = 0,0308$ (для 40 років експлуатації. Таблиця Д.1.2 Аналізу) для точки 9а зварного з'єднання № 3 (внутрішня поверхня) КР.