

О. Майборода, Шкапяк. Оцінювання точності та достовірності при побудові дозових залежностей зсувів критичної температури крихкості згідно з методикою Verlife на основі даних досліджень зразків-свідків АЕС України / О. Майборода, О. Шкапяк // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 71. — № 3. — С.244-252. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 621.039

О. Майборода; О. Шкапяк

Інститут ядерних досліджень НАН України

## ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ТА ДОСТОВІРНОСТІ ПРИ ПОБУДОВІ ДОЗОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗСУВІВ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ ЗГІДНО З МЕТОДИКОЮ VERLIFE НА ОСНОВІ ДАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ АЕС УКРАЇНИ

**Резюме.** Аналіз впливу відмінностей в нормативних підходах Verlife та ПНАЕ на оцінку окрихчування корпусу реактора виконано на основі співставлення розрахунків чотирьох реальних наборів даних досліджень зразків-свідків АЕС України, які містять 4–6 точок при різних значеннях флюенсу. Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що використання змінного коефіцієнта степеня у формулі залежності зсуву критичної температури крихкості  $\Delta T_F$  від флюенсу може призвести до неконсервативних та недостовірних результатів.

**Ключові слова:** зсув критичної температури крихкості, зразки-свідки, флюенс, коефіцієнт детермінації.

E. Mayboroda, A. Shkapyak

## EVALUATION OF THE ACCURACY AND VALIDITY IN CONSTRUCTING THE DOSE DEPENDENCE OF TRANSITION TEMPERATURE SHIFTS BASED ON UKRAINIAN NPP'S SURVEILLANCE SPECIMEN TEST DATA ACCORDING TO THE VERLIFE METHOD

**Summary.** The main material science problem of WWPR-1000 is a fracture toughness degradation of pressure vessel steel due to the influence of neutron irradiation, which manifests itself in the temperature embrittlement shift towards higher temperatures.

Analysis of differences between Verlife (annex III) and PNAE-G-7-002-86 methodologies of trend curves building was fulfilled while using real data sets of Ukrainian NPP's surveillance specimen tests, containing 4–6 points for different values of fluence.

When performing calculations dose dependency ratios of transition temperature shifts is setting appropriate initial conditions  $\Delta T_F(0) = 0$ , since poorly correlated data sets results of calculation by the Verlife method may be incorrect. Despite the fact, that the calculation without initial conditions by the PNAE-G-7-002-86 method can produce negative values of the coefficient of determination, the value of  $A_F$  is calculated reliably.

The accuracy of the regression coefficients  $A_F$  calculation with variable  $n$  is usually at least 30% (and may reach even 50%), while for  $n = 1/3$ , this value does not exceed 10%. However, the coefficient of determination is always higher when performing calculations with variable exponent  $n$ , indicating that the inability to use  $R^2$  as a criterion for comparison of accuracy considered methods.

Stability analysis of simulation results for both methods, when setting small deviations ( $1 - 2^\circ\text{C}$ ) values transition temperature shifts, showed that the use of Verlife methods results may differ fundamentally, until the change of material radiation embrittlement view. Calculation of the rate constant degree  $n$  is resistant to small deviations  $\Delta T_F$ .

Obtained results shows that validity and accuracy of Verlife methodology is lower than PNAE-G-7-002-86 one.

**Key words:** transition temperature shift, surveillance specimen, fluence, coefficient of determination.

**Вступ.** Метою роботи є аналіз підходу методики Verlife до побудови залежності зсуву критичної температури крихкості від накопиченого флюенсу. Необхідність проведення такого аналізу зумовлена тим, що для деяких енергоблоків АЕС України методика Verlife використовується для виконання робіт, які пов'язані з продовженням терміну експлуатації корпусів реакторів (КР).

Методика Verlife [1] була розроблена в Інституті ядерних досліджень Ржеж у 2003 році, доповнена у 2008 році, та, в цілому, є сучаснішим нормативним документом, ніж діючий в Україні ПНАЕ-Г-7-002-86 [2]. Залежності зсуву критичної температури крихкості  $\Delta T_F$  від флюенсу (за термінологією Verlife – трендові криві) в обох документах мають вигляд

$$\Delta T_F = A_F \left( \frac{F_n}{F_0} \right)^n, \quad (1)$$

де  $F_n$  – флюенс швидких нейтронів ( $E > 0,5 \text{ MeV}$ ),  $F_0 = 10^{22}$  нейтр/м<sup>2</sup>;  $A_F$  – коефіцієнт радіаційного окрихчування;  $n$  – показник степеня, який в [1] є змінною величиною, а в [2] приймається рівним 1/3.

В [2] не міститься вимог стосовно довірчих оцінок для дозових залежностей  $\Delta T_F$ , проте в документі НАЕК «Енергоатом» «Типова програма контролю властивостей металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 по зразках-свідках» [3] вказано, що оцінювання степеня радіаційного окрихчування металу КР повинна здійснюватися за 95% верхньою огинаючою лінії регресії ( $A_F^{95\%}$ ) відповідних результатів досліджень зразків-свідків (ЗС). Таким чином, підхід, який застосовують в Україні, базується на побудові оцінювання 95% довірчого інтервалу для коефіцієнта регресії  $A_F$  та значною мірою відрізняється від використаної в [1] верхньої огинаючої зсувів критичної температури крихкості  $\Delta T_F$ .

Слід також відзначити, що в методиці Verlife не міститься вимог стосовно оцінювання довірчих інтервалів для ймовірності 95% при опрацюванні первісних результатів досліджень опромінених ЗС не ударний згин та в'язкість руйнування, тобто не передбачається оцінювання можливих викидів експериментальних даних.

**Результати дослідження.** Аналіз впливу відмінностей в нормативних підходах [1] та [2] на оцінювання окрихчування КР виконано на основі співставлення розрахунків реальних наборів даних досліджень ЗС АЕС України. Всі використані в аналізі результати досліджень ЗС є представницькими й отримані з дотриманням нормативних вимог стосовно кількості ЗС у групі та розкиду даних по флюенсу.

В якості критерію достовірності побудови лінії регресії обрано перевірку збігу коефіцієнтів регресії дозових залежностей  $\Delta T_F$  за умови безпосереднього задавання  $\Delta T_F(0) = 0^\circ \text{C}$  і за відсутності в наборі даних цього значення. Кожен з розглянутих наборів даних був розрахований при використанні методу найменших квадратів 4 рази: зі змінним степеня  $n$  і з  $n = 1/3$  при не заданому значенні  $\Delta T_F(0)$  і при  $\Delta T_F(0) = 0^\circ \text{C}$ . Результати розрахунків представлені в таблиці 2 і на рис. 1 – 4. Для побудови верхньої огинаючої згідно з методикою Verlife в таблиці 2 наведено значення максимальної позитивної різниці  $\delta(\Delta T_F)$  між значеннями  $\Delta T_F$ , отриманими за результатами випробувань ЗС, і розрахованими за рівнянням (1), а також значення середньоквадратичного відхилення  $\delta T_M$

$$\delta(\Delta T_F) = \Delta T_F - A_F \left( \frac{F}{F_0} \right)^n. \quad (2)$$

$$\delta T_M = \sqrt{\frac{k \sum (\delta(\Delta T_F))^2 - (\sum \delta(\Delta T_F))^2}{k^2}}. \quad (3)$$

Слід зазначити, що для всіх виконаних розрахунків, за винятком одного випадку,  $\delta(\Delta T_F)$  перевищує  $\Delta T_M$ .

Аналіз результатів опрацювання наборів даних SET1 і SET2 (рис. 1 і рис. 2 відповідно) показує, що в першому випадку згідно з ПНАЕ-Г-7-002-86 [2] отримано

низький рівень окрихчування, в той час як використання методики Verlife [1] дає більш несприятливий прогноз для даного матеріалу. Оцінювання того, що консерватизм методики [1] в даному випадку є виправданим, можна буде виконати після вивантаження наступного опроміненого комплексу зразків-свідків.

**Таблиця 1**

Набори даних  $\Delta T_F$

Набір даних	Флюенс ( $E > 0,5 \text{ МэВ}$ ), $10^{22}$ , нейтр/ $\text{м}^2$	$\Delta T_F, ^\circ\text{C}$
SET1	4,0	16
	5,9	13
	8,3	21
	13,8	19
	21,2	34
SET2	8,4	42
	10,7	57
	20,4	74
	27,5	42
	50,8	46
	68,8	75
SET3	14,0	43
	24,5	33
	37,4	51
	54,4	33
SET4	4,69	25
	10,5	21
	13,8	29
	25,9	43
	33,3	40

Разом з тим, результати опрацювання набору даних SET2 демонструють, що підхід [1] може бути менш консервативним, ніж прийнятий у нормах [2].

Опрацювання цього набору даних згідно з ПНАЕ-Г-7-002-86 [2] дає перевищення нормативного коефіцієнта радіаційного окрихчування коефіцієнтом 95% огинаючої лінії регресії ( $A_F 95\%$ ), що свідчить про високий рівень окрихчування, який необхідно враховувати, в першу чергу, при продовженні експлуатації даного корпусу реактора (КР). Побудована за методикою [1] дозова залежність зсуву критичної температури крихкості для набору даних SET2, навпаки, демонструє рівень окрихчування істотно нижче нормативного при флюенсі, що перевищують  $40 \cdot 10^{22}$  нейтр/ $\text{м}^2$ , тобто дає неконсервативний прогноз на тривалий термін експлуатації.

Результати розрахунку набору даних SET3 за обома методиками [1] і [2] представлені на рис. 3. Як бачимо, підхід Verlife [1] при умові незадавання нульового значення  $\Delta T_F(0) = 0^\circ\text{C}$  і дотриманні вимоги п. 3.1.4 [1] стосовно того, що методика може бути використана за наявності даних при щонайменше трьох значеннях флюенса, дає недостовірний результат. Те, що отримана крива в околі нульової точки

асиметрично прямує до нескінченності, суперечить фізиці процесу окрихчування, оскільки при нульовому флюенсу  $\Delta T_F(0)$  завжди має дорівнювати  $0^\circ\text{C}$ .

Дані, представлені на рис. 4, свідчать про те, що при певному розташуванні експериментальних точок результати розрахунку за обома методиками можуть бути близькими і практично збігатися.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що використання змінного коефіцієнта степеня у формулі залежності зсуву критичної температури крихкості  $\Delta T_F$  від флюенса (1) може призвести до неконсервативних (SET2) і недостовірних (SET3) результатів.

У табл. 2 представлені дані, що дозволяють оцінити точність обчислення коефіцієнтів регресії  $A_F$  і  $n$  при використанні обох методик [1] і [2], а також коефіцієнти детермінації  $R^2$ , які при оцінюванні регресійних моделей інтерпретуються як міра відповідності моделі даним.

Отримані результати демонструють, що при незаданому значенні  $\Delta T_F(0)$  коефіцієнти детермінації можуть бути дуже низькими і навіть негативними (SET2 і SET3), що свідчить про некоректність використання статичної залежності для таких наборів даних. Для досягнення доброго рівня кореляції при апроксимації дозових залежностей зсувів критичної температури крихкості задавання умови  $\Delta T_F(0) = 0^\circ\text{C}$  слід визнати необхідним.

Для корельованих наборів даних методика [1] дає більш високі (SET1, SET2 і SET3) або такі ж (SET4) значення коефіцієнта детермінації, як і [2]. Однак цього недостатньо для того, щоб стверджувати, що Verlife краще описує розглянуті набори даних.

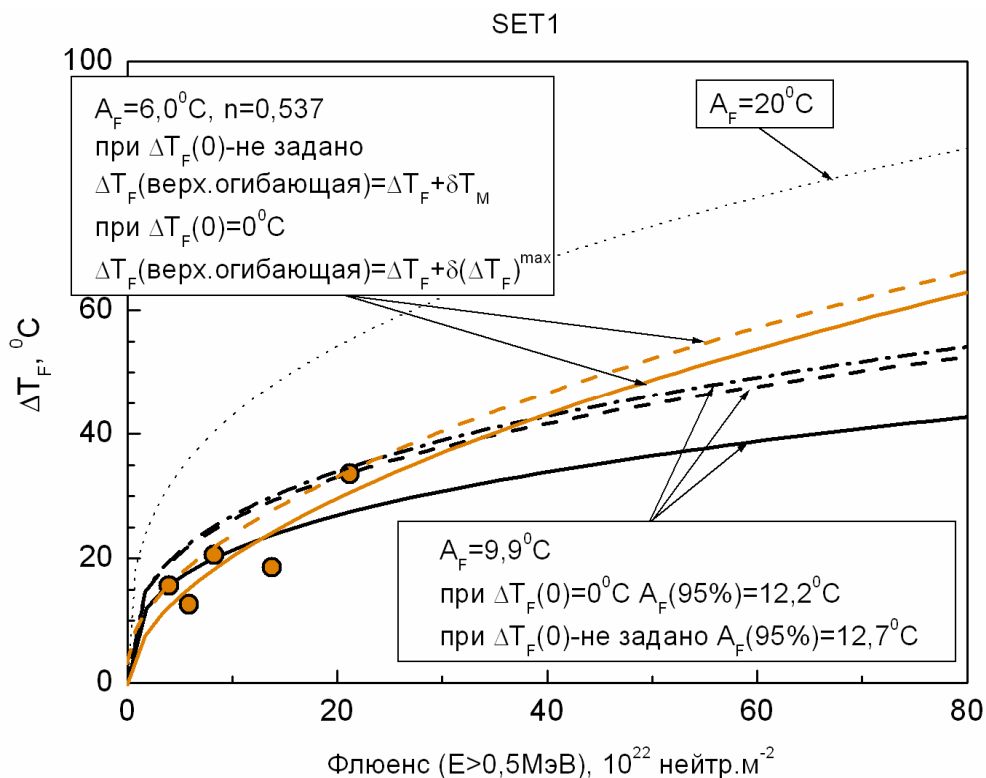
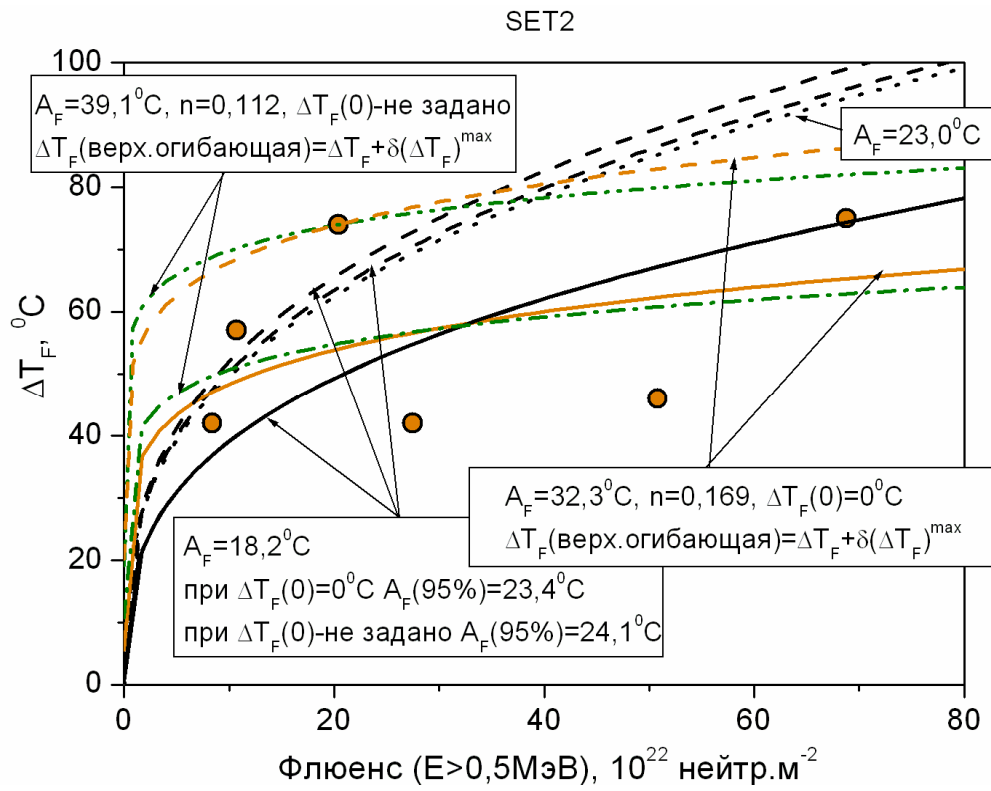


Рисунок 1. Результати порівняльних розрахунків (SET1)

Figure 1. The results of comparative calculations (SET1)



**Рисунок 2.** Результати порівняльних розрахунків (SET2)

**Figure 2.** The results of comparative calculations (SET2)

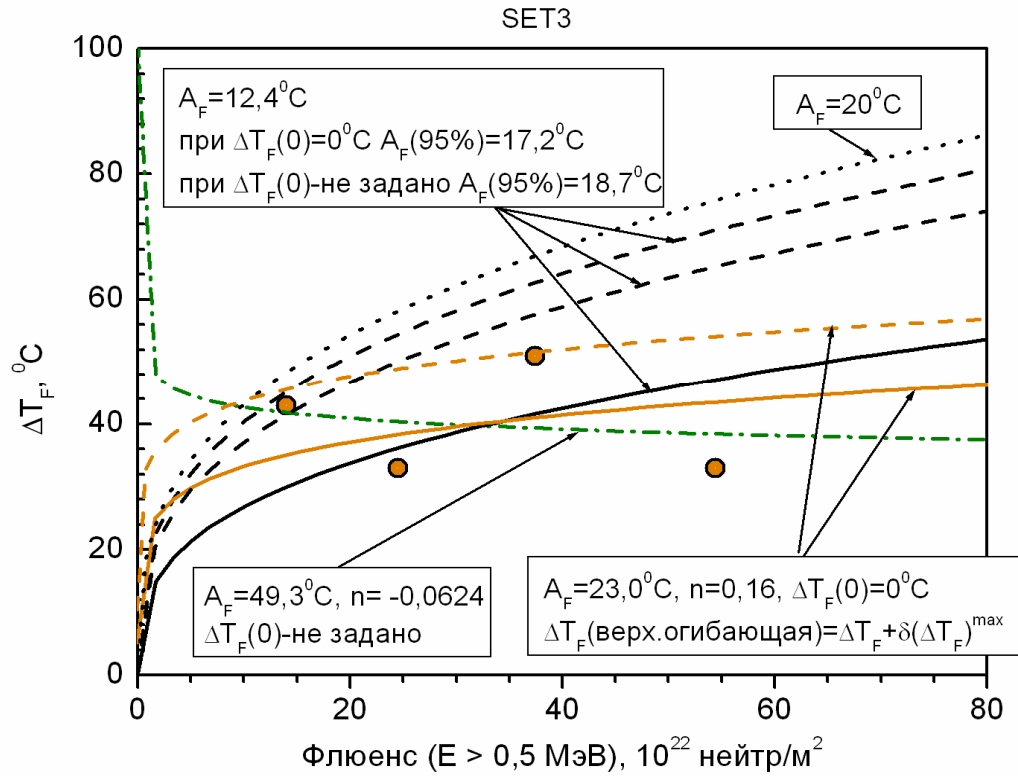


Рисунок 3. Результати порівняльних розрахунків (SET3)

Figure 3. The results of comparative calculations (SET3)

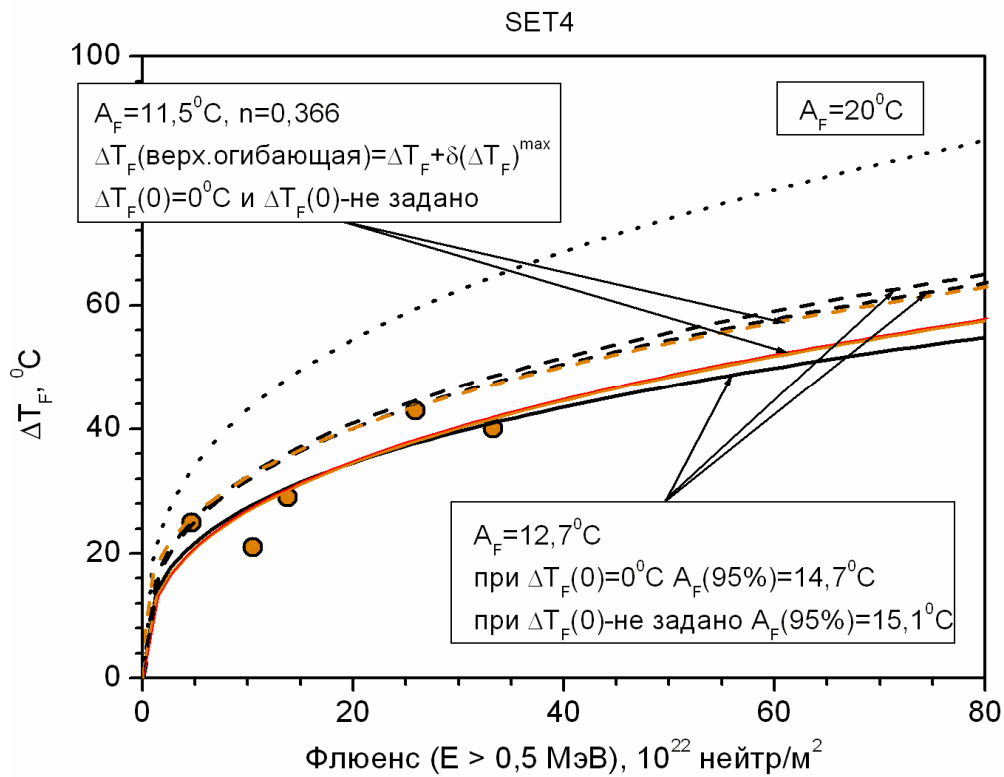


Рисунок 4. Результати порівняльних розрахунків (SET4)

Figure 4. The results of comparative calculations (SET4)

Зупинимося на аналізі точності обчислення коефіцієнта радіаційного окрихчування  $A_F$  і показника степеня  $n$ . При  $n = 1/3$  точність обчислення  $A_F$  для всіх розглянутих наборів даних як при не заданому значенні  $\Delta T_F(0)$ , так і при  $\Delta T_F(0) = 0^\circ\text{C}$  відрізняється незначно (трохи вище за наявності початкової умови, що прогнозовано). Зіставлення точності обчислення коефіцієнта радіаційного окрихчування за методиками [1] і [2] при  $\Delta T_F(0) = 0^\circ\text{C}$  показало, що точність обчислення  $A_F$  за методикою [1] для SET2 і SET3 нижче більш ніж у 6 разів.

Таблиця 2

Точність обчислення параметрів регресії

Набір даних	$\Delta T_F(0), ^\circ\text{C}$	$n$	Похибка $n$	$A_F, ^\circ\text{C}$	Похибка $A_F, ^\circ\text{C}$	$R^2$	$\delta(\Delta T_F), ^\circ\text{C}$	$\delta T_M, ^\circ\text{C}$
SET1	Не задано	0,333	-	9,9	$\pm 0,99$	0,65	6,6	4,25
		0,537	$\pm 0,177$	6,0	$\pm 2,77$	0,76	3,37	3,56
	0	0,333	-	9,9	$\pm 0,88$	0,85	6,6	3,88
		0,537	$\pm 0,153$	6,0	$\pm 2,40$	0,9	3,37	3,25
SET2	Не задано	0,333	-	18,2	$\pm 2,33$	-0,29	24,28	15,82
		0,112	$\pm 0,155$	39,1	$\pm 20,58$	0,11	19,19	13,16
	0	0,333	-	18,2	$\pm 2,13$	0,61	24,28	14,66
		0,169	$\pm 0,112$	32,3	$\pm 12,58$	0,71	20,23	12,4
SET3	Не задано	0,333	-	12,4	$\pm 1,98$	-1,05	13,1	10,71
		-0,062	$\pm 0,259$	49,3	$\pm 43,04$	0,03	-	-
	0	0,333	-	12,4	$\pm 1,71$	0,69	13,1	9,6
		0,159	$\pm 0,136$	23,0	$\pm 11,00$	0,78	10,49	7,9
SET4	Не задано	0,333	-	12,7	$\pm 0,84$	0,74	5,43	4,3
		0,366	$\pm 0,128$	11,5	$\pm 4,46$	0,75	5,2	4,27
	0	0,333	-	12,7	$\pm 0,76$	0,92	5,43	3,93
		0,366	$\pm 0,111$	11,5	$\pm 3,86$	0,92	5,2	3,9

Відносні похибки обчислення коефіцієнтів регресії для змінного показника степеня  $n$  складають 30 – 80%, що є неприйнятним, оскільки не дозволяє достовірно прогнозувати рівень радіаційного окрихчування КР. Для коефіцієнтів радіаційного окрихчування  $A_F$ , обчислених за [1], відносні похибки становлять 30 – 50%, а для обчислених за чинним в Україні нормативним документом [2] не перевищують 14%.

Таблиця 3

Дані для аналізу стійкості

Набір даних	Флюенс ( $E > 0,5 \text{ МэВ}$ ), $10^{22}$ , нейтр/ $\text{м}^2$	$\Delta T_F$ , °C	Коефіцієнти регресії	
			[1]	[2]
SET5	0,0	0	$A_F=6,67$ $n=0,586$	$A_F=10,6$ $n=0,333$
	4,0	16		
	8,3	21		
SET5*	0,0	0	$A_F=9,5$ $n=0,375$	$A_F=10,3$ $n=0,333$
	4,0	15		
	8,3	23		

Таким чином, точність обчислення коефіцієнта радіаційного окрихчування  $A_F$  і показника степеня  $n$  при використанні підходу Verlife [1] істотно нижче, ніж за методикою ПНАЕ-Г-7-002-86 [2]. Це, в першу чергу, зумовлено тим, що для використання змінного показника степеня потрібно досліджувати достатню кількість наявних точок у наборах даних, а дотримання вимоги Verlife про необхідність наявності, принаймні, трьох значень зсувів критичної температури крихкості при різних значеннях флюенса є недостатнім для забезпечення прийнятної точності обчислення коефіцієнтів регресії.

Додатково було виконано аналіз стійкості методик [1] і [2] до малих відхилень вихідних даних, два набори даних для такого дослідження і результати розрахунків наведено в табл. 3. Як бачимо, при використанні методики Verlife результати істотно відрізняються.

**Висновки.** Методика Verlife може давати неконсервативний прогноз на тривалий термін експлуатації матеріалів КР в порівнянні з ПНАЕ-Г-7-002-86 (SET2 і SET3).

При виконанні розрахунків коефіцієнтів дозових залежностей зсуву критичної температури крихкості доцільним є задавання початкової умови  $\Delta T_F(0) = 0$ , оскільки для погано корельованих наборів даних результати розрахунку за методикою Verlife можуть бути некоректними (SET3). Незважаючи на те, що розрахунок без початкової умови за методикою ПНАЕ-Г-7-002-86 може давати негативні значення коефіцієнта детермінації, значення  $A_F$  обчислюються достовірно.

Розрахунок набору даних SET1 показав, що результати за методикою Verlife можуть бути більш консервативні, ніж за ПНАЕ-Г-7-002-86. Однак для оцінювання виправданості такого консерватизму необхідно виконати додаткові дослідження.

Для набору даних SET4, який добре апроксимується степеневою функцією, результати розрахунків за обома розглянутими методиками практично збігаються.

Точність обчислення коефіцієнтів регресії  $A_F$  у розрахунках з перемінним  $n$  складає, як правило, не менше 30% (а може сягати й 50%), у той час як при  $n = 1/3$  цей показник не перевищує 10%. Разом з тим, коефіцієнт детермінації завжди є вищим при виконанні розрахунків зі змінним показником степеня  $n$ , що свідчить про неможливість використання  $R^2$  в якості критерію співставлення коректності розглянутих методик.

Аналіз стійкості результатів розрахунків за обома методиками при малих відхиленнях ( $1 - 2^\circ\text{C}$ ) значень зсувів критичної температури крихкості показав, що при використанні методики Verlife результати можуть принципово відрізнитися, аж до зміни уявлення про радіаційне окрихчування матеріалу (SET5). Розрахунок з постійним показником степеня  $n$  стійкий до малих відхилень  $\Delta T_F$ .



Для побудови дозових залежностей зсувів критичної температури крихкості при використанні моделей на основі степеневі функції, показник степеня доцільно вибирати постійним.

**Conclusions.** The Verlife method can give non-conservative prediction for long life materials in the reactor vessel over PNAE-G-7-002-86 (SET2 and SET3).

When performing calculations dose dependency ratios of transition temperature shifts is setting appropriate initial conditions  $\Delta T_F(0) = 0$ , since poorly correlated data sets results of calculation by the Verlife method may be incorrect (SET3). Despite the fact that the calculation without initial conditions by the PNAE-G-7-002-86 method can produce negative values of the coefficient of determination, the value of  $A_F$  is calculated reliably..

Calculation of the SET1 showed that the results of the Verlife method may be more conservative, than the PNAE-G-7-002-86, however, estimation of the correctness of such conservatism needs do more research.

For the SET4, which is well approximated by a power function, the results of calculations by both techniques is almost identical.

The accuracy of the regression coefficients  $A_F$  calculation with variable  $n$  is usually at least 30% (and may reach even 50%), while for  $n = 1/3$ , this value does not exceed 10%. However, the coefficient of determination is always higher, when performing calculations with variable exponent  $n$ , indicating that the inability to use  $R^2$  as a criterion for comparison of accuracy considered methods.

Stability analysis of simulation results by both methods, when setting small deviations (1 – 2°C) values transition temperature shifts, showed that the use of the method Verlife the results may differ fundamentally, until the change of material radiation embrittlement view (SET5). Calculation of the rate constant degree  $n$  is resistant to small deviations  $\Delta T_F$ .

To construct the dose dependence of the fragility critical temperature shifts while using models based on a power function, exponent should be chosen constant.

### **Список використаної літератури**

1. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs – VERLIFE, European Commission, Final Report, Contract N° FIKS-CT-2001-20198, September 2003 (2008).
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 524 с.
3. Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям. № ПМ-Т.0.03.120–08 / ГП НАЭК «Энергоатом». – 2008. – 36 с.

*Отримано 10.08.2013*