

# ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ВИГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 В УМОВАХ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ

О.В. Махненко, С.М. Кандала

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Email: [makhnenko@paton.kiev.ua](mailto:makhnenko@paton.kiev.ua), [st\\_kan@ukr.net](mailto:st_kan@ukr.net)

На даний час більшість реакторів ВВЕР-1000 на АЕС України проходить процедуру продовження строку експлуатації. Внутрішньокорпусні пристрої реактора є одними з ключових елементів конструкції, які обмежують надпроектний термін експлуатації АЕС. Фізичний контроль стану ВКП є досить важким, а для деяких ділянок і неможливим. Тому основним методом прогнозування та аналізу технічного стану є математичне моделювання. Слід зазначити, що більшість досліджень у цій області обмежуються моделюванням режиму нормальної експлуатації, але в проект закладені також і аварійні ситуації (АС), які характеризуються досить різкою зміною граничних умов та навантажень, що сприяє утворенню досить високих напружень. У роботі розглянуто, як залишкові технологічні напруження, що утворилися в процесі виготовлення вигородки внутрішньокорпусних пристроїв, можуть впливати на значення коефіцієнта інтенсивності напружень на контурі постульованих тріщин під час протікання АС. Виявлено суттєвий вплив ЗТН на опір крихкому руйнуванню вигородки під час АС, що необхідно враховувати при розрахунковому обґрунтуванні продовження терміну експлуатації енергоблоків типу ВВЕР-1000. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 7.

*Ключові слова:* ВВЕР-1000, внутрішньокорпусні пристрої, вигородка, залишкові технологічні напруження, аварійна ситуація, тріщиноподібний дефект, коефіцієнт інтенсивності напружень

**Вступ.** Удосконалення методів продовження ресурсу діючих атомних електростанцій в Україні є однією з актуальних задач у галузі атомної енергетики. Аварійна ситуація (АС) – це режим експлуатації з жорсткими умовами навантаження [1]. При цьому в деяких випадках за проектом передбачено не більше одного такого сценарію за весь термін експлуатації (включаючи надпроектний). Внутрішньокорпусні пристрої (ВКП) реактора, такі як вигородка і внутрішньокорпусна шахта, є одними з ключових елементів конструкції енергетичної установки ВВЕР-1000, які обмежують надпроектний термін експлуатації АЕС. Раніше було розглянуто подібні задачі розрахункового прогнозування опору крихкому руйнуванню (ОКР) елементів ВКП при АС [1] та нормальних умов експлуатації [2], але при цьому не враховувались залишкові технологічні напруження (ЗТН), які виникають у процесі виробництва вигородки. За опублікованими результатами подібних розрахунків [1] для постульованих у вигородці тріщиноподібних дефектів було отримано значення  $J$ -інтеграла, що близькі до критичних. Ураховуючи результати останніх досліджень у цьому напрямку, а саме суттєвий вплив ЗТН на напружено-деформований стан (НДС) вигородки ВКП при нормальних умовах експлуатації [3], актуальним є проведення аналізу впливу ЗТН на НДС та ОКР вигородки ВКП в умовах АС.

**Режим аварійної ситуації.** У якості АС було розглянуто режим великої течі при розриві

трубопроводів першого контуру з умовним діаметром 100...850 мм. Математична модель НДС вигородки включає врахування ЗТН [4], накопиченої радіаційної дози за 60 років експлуатації, а також температурні розподіли. Аварійна ситуація, що розглянута в даній роботі, супроводжується різким падінням тиску та температури теплоносія. У якості початкових параметрів використовувалося температурне поле, що отримане внаслідок гамма-опромінювання та контакту теплоносія з поверхнею вигородки [4], та розподіл НДС без врахування (рис. 1, а, в) та з врахуванням (рис. 1, б, г) ЗТН, які відповідають режиму нормальної експлуатації реактора та описані в [3]. З умов консервативності в розрахунковій моделі приймалося, що режим АС відбувається після 60-ти років експлуатації реактора. Урахування радіаційного розпухання та повзучості протягом усього строку експлуатації описано за допомогою математичних моделей [5], коректність яких було розглянуто в [6].

Протікання процесу аварійної ситуації супроводжується зміною граничних умов (коефіцієнта тепловіддачі та температури теплоносія) і навантажень (тиск) за часом. Закони зміни граничних умов показано на рис. 2.

При моделюванні розглянутої АС було визначено, що максимальні значення напружень спостерігаються в момент часу  $t = 100$  с з початку протікання АС. Температурне поле показано на рис. 3. Також було отримано розподіли напружень в осьовому напрямку з урахуванням і без урахування ЗТН (рис. 4).

Махненко О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8583-0163>, Кандала С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2036-0498>

© О.В. Махненко, С.М. Кандала, 2022

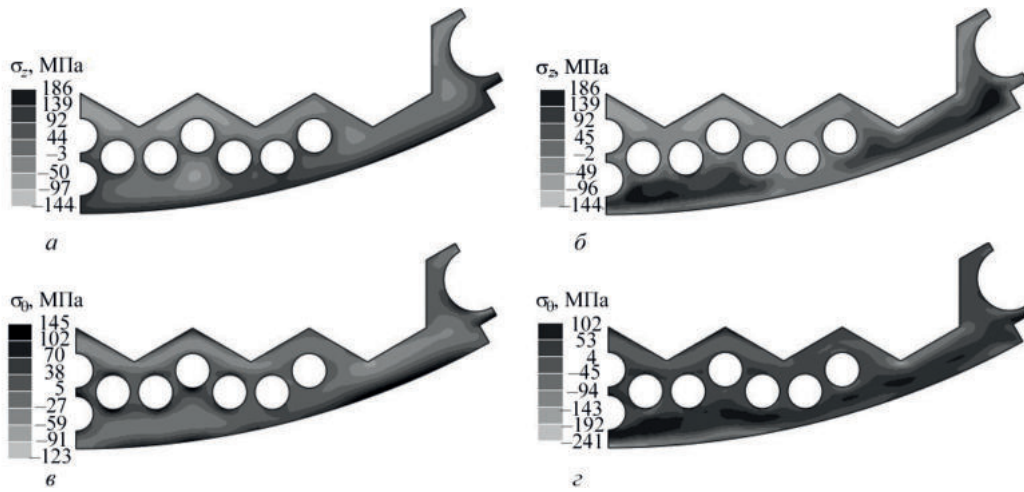


Рис. 1. Розподіли напружень у вигородці на 60-му році експлуатації: а – осьова компонента без урахування ЗТН; б – осьова компонента з урахуванням ЗТН; в – окружна компонента без урахування ЗТН; г – окружна компонента з урахуванням ЗТН

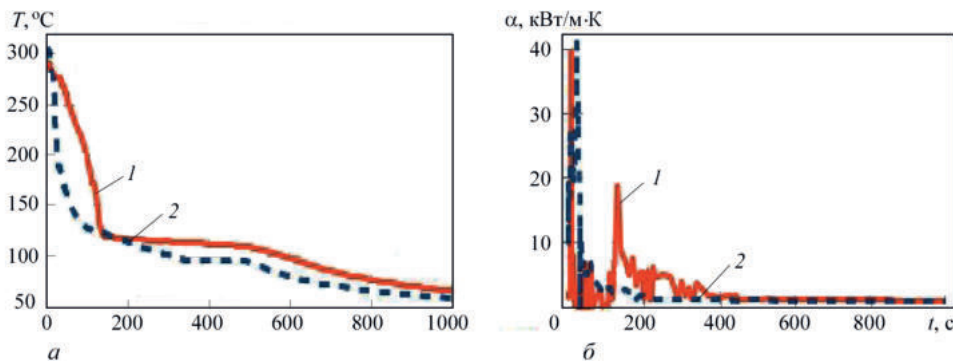


Рис. 2. Зміна температури (а) та коефіцієнта тепловіддачі (б) стінок вигородки під час АС: 1 – внутрішня поверхня, 2 – зовнішня поверхня

Як видно з рис. 4, урахування ЗТН істотно впливає на розподіл напружень. Так, максимальний рівень осьових напружень на внутрішній поверхні вигородки при врахуванні ЗТН зменшується з 488 до 416 МПа, проте в об’ємі вигородки поблизу зовнішньої поверхні стискаючі напруження (до –200 МПа) при врахуванні ЗТН переходять у розтягуючі (до 50 МПа).

У [1] було визначено, що при протіканні АС в зонах 1 і 2 (рис. 4) перерізу вигородки, що розглядається, значення  $J$ -інтеграла для постульованих тріщин знаходиться в межах критичного. Слід зазначити, що при цьому не були враховані залишкові технологічні напруження. У даній роботі розглянуто вплив ЗТН на значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) на контурі постульованих тріщин, які розташовано в площині поперечного перерізу вигородки, під дією осьових напружень в умовах протікання АС.

**Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень.** Визначення КІН було виконано згідно з методиками, описаними в [7] і [8]:

$$K_I = \sigma_K Y \sqrt{a} \quad (1)$$

де  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м<sup>0.5</sup>;  $\sigma_K$  – напруження, приведені до рівномір-



Рис. 3. Температурне поле в момент часу  $t = 100$  с з початку АС

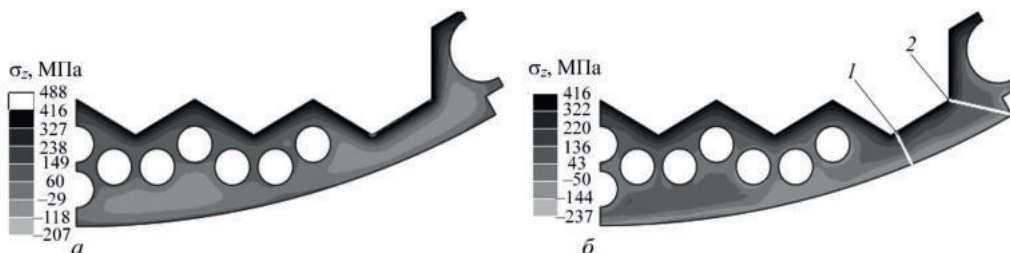


Рис. 4. Розподіли осьових напружень на  $t = 100$  с протікання АС без урахування (а) та з урахуванням (б) ЗТН

ного, МПа;  $Y$  – коефіцієнт форми тріщини;  $a$  – мала піввісь тріщини, мм.

Так як зона максимальних розтягуючих напружень в осьовому напрямку знаходиться на внутрішній поверхні вигородки, а при врахуванні ЗТН ця зона збільшується в напрямку зовнішньої поверхні, то постульовані дефекти були закладені у вигляді поверхневої напівеліптичної і підповерхневої еліптичної тріщини (рис. 5), які розташовані на мінімальній глибині ( $h \geq a/9$ ). Співвідношення малої півосі до великої відповідно до вимог [5] становить  $a/c = 1/3$ .

Розподіл напружень у разі постулювання еліптичної підповерхневої тріщини, заданих у довільній формі, згідно з [7] обчислюються для координат по товщині  $x_j = h + a/10$ , де  $j = 0, 1, 2, \dots, 20$ ,  $h$  – глибина розташування дефекту. У кожній точці  $x_j$  визначаються напруження  $\sigma_j = \sigma_K(x_j)$ . Значення приведених до рівномірного напружень  $\sigma_K(A)$  та  $\sigma_K(C)$  обчислюються за залежностями:

$$\sigma_K(A) = \sum_{j=0}^{20} \left( A_j + \frac{a}{c} B_j \right) \sigma_j,$$

$$\sigma_K(C) = \sum_{j=0}^{20} \left( A_{20-j} + \frac{a}{c} B_{20-j} \right) \sigma_j, \quad (2)$$

де  $A_j$  і  $B_j$  – табличні значення [7].

При визначенні приведених до рівномірного напружень  $\sigma$  при їх параболічному розподілі для поверхневої напівеліптичної тріщини використовувався метод, описаний в [8]:

$$\sigma_K(A) = 0,61\sigma_A + 0,39\sigma_B + \left\{ 0,11 a/c - 0,28 a/s \left[ 1 - (a/c)^{1/2} \right] \right\} \cdot (\sigma_A - \sigma_B);$$

$$\sigma_K(B) = 0,18\sigma_A + 0,82\sigma_B. \quad (3)$$

Коефіцієнти форми для кожного з розглянутих випадків також визначалися за різними методиками. Так, згідно з [7] для еліптичних підповерхневих тріщин:

$$Y_{A,C} = \left[ 1 - \left( \frac{a}{h+a} \right)^{1,8} \left( 1 - 0,4 \frac{a}{c} - \gamma_{A,C} \right) \right]^{-0,54} \times \left[ \frac{\pi}{1 + 1,464(a/c)^{1,65}} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

при  $a \leq c$ ,  $a \leq 9h$ ,  $h + a \leq s/2$ ;

$$\gamma_A = \left( 0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^2, \quad \gamma_C = 0,8 \left( 0,5 - \frac{h+a}{s} \right)^{0,4} \quad (5)$$

де  $s$  – товщина вигородки, мм.

При постулюванні підповерхневих напівеліптичних тріщин згідно з [8] коефіцієнти форми визначалися за наступними залежностями:

$$Y_A = \frac{2 - 0,82 a/c}{\left\{ 1 - \left[ 0,89 - 0,57(a/c)^{1/2} \right]^3 (a/s)^{1,5} \right\}^{3,25}} \quad (6)$$

$$Y_B = \left[ 1,1 + 0,35 (a/s)^2 \right] (a/c)^{1/2} Y_A$$

**Результати розрахунку.** З метою визначення впливу ЗТН на ОКР у двох перерізах (рис. 4) було постульовано два дефекти у вигляді еліптичних підповерхневих тріщин. Геометричні параметри, а також коефіцієнти форми, отримані з виразів (\*) для кожного з дефектів, показано в табл. 1. На рис. 6 представлено розподіл осьових напружень у момент часу  $t = 100$  с з початку аварійної ситуації, з яких видно суттєвий вплив ЗТН на рівень напружень у розглянутих перерізах 1 і 2.

У табл. 2 показано результати розрахунку максимальних еквівалентних напружень і КІН для трьох характерних точок дефектів, що постулюються, у момент часу  $t = 100$  с режиму АС.

Як видно з табл. 2, у цілому врахування ЗТН знижує значення еквівалентних напружень незалежно від розташування характерних точок ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$ ) і типу постульованого дефекту, що веде до зниження значення КІН. Але треба відзначити, що у випадку з урахуванням ЗТН за рахунок перерозподілу напру-

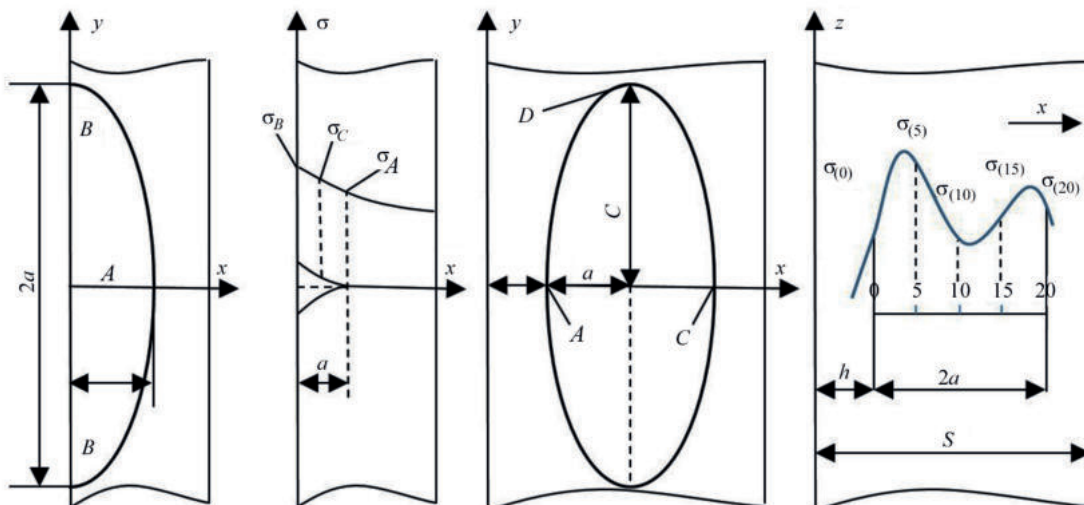


Рис. 5. Геометричні параметри напівеліптичної поверхневої (а) та еліптичної підповерхневої тріщини (б) з розподілом напружень (б, с)

Таблиця 1. Геометричні параметри постульованих дефектів

Номер перерізу	$a$ , мм	$c$ , мм	$h$ , мм	$s$ , мм	$Y_A$	$Y_C/Y_B^*$	$Y_D$
Поверхнева напівеліптична тріщина							
1 (без ЗТН)	21,3	63,9	–	71	1,9	1,24	–
1 (із ЗТН)	35,5	106,5	–	71	2,13	1,46	–
2 (без ЗТН)	16,375	49,125	–	131	1,77	1,13	–
2 (із ЗТН)	35,5	106,5	–	131	1,87	1,22	–
Підповерхнева еліптична тріщина							
1 (без ЗТН)	8,875	26,75	1,7	71	2,43	1,86	2,6
1 (із ЗТН)	17,75	53,25	1,7	71	3,0	2,03	3,52
2 (без ЗТН)	8,125	24,375	3,3	131	2,06	1,76	2,08
2 (із ЗТН)	32,75	70,0	3,3	131	2,59	1,82	3,23

Примітка. \* $Y_B$  – для поверхневої напівеліптичної тріщини;  $Y_C$  – для підповерхневої еліптичної тріщини (рис. 5).

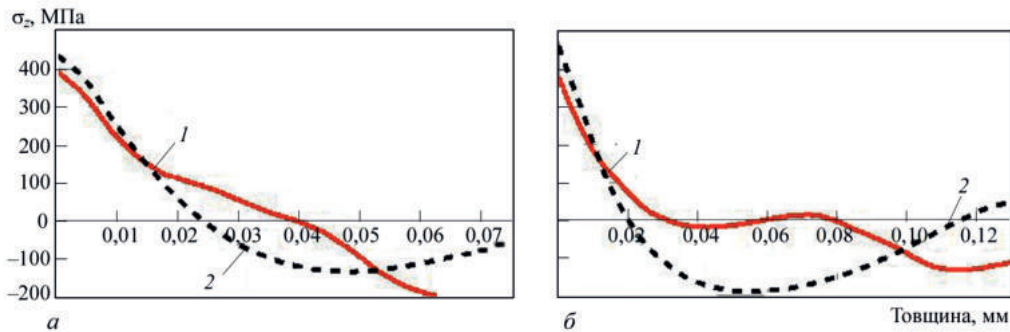


Рис. 6. Розподіл осевих напружень у перерізах 1 і 2 вигородки в момент часу  $t = 100$  с режиму АС: а – переріз 1; б – переріз 2; 1 – з урахуванням ЗТН; 2 – без урахування ЗТН

жень зона розтягуючих напружень збільшується, що дозволяє збільшити розміри постульованої тріщини. Збільшення розмірів постульованого дефекту може призвести до підвищення значення КІН.

При постулюванні поверхневої напівеліптичної тріщини було визначено, що в кожному з розглянутих перерізів при врахуванні ЗТН у точках А значення КІН значно знижується, на 30 % для перерізу № 1 та на 34 % для перерізу № 2, однак у точках В спостерігається зростання на 23 і 16 % відповідно. Варто відзначити, що максимальні значення КІН визначені в точках В, отже з точки зору оцінки ОКР модель, яка враховує ЗТН, є більш консервативною.

При розгляді підповерхневої еліптичної тріщини було визначено, що при врахуванні ЗТН рівень КІН для точок А і D збільшується, для точки С характерним є несуттєве зниження. Спостерігається збільшення значення КІН для точок А і D, у пере-

різі № 1 на 31 і 27 %, а в перерізі № 2 на 37 і 41 % відповідно (табл. 2).

Еліптична підповерхнева тріщина є небезпечнішою з точки зору ОКР, а її значення в умовах аварійної ситуації можуть досягати критичних значень (у перерізі № 1 в момент часу  $t = 100$  с з початку АС з урахуванням ЗТН  $K_1 = 102,2$  МПа·м<sup>0,5</sup>). Розподіл критичних значень КІН в матеріалі вигородки представлено на рис. 7.

У [1] розглянута АС з жорсткішими граничними умовами. При цьому в одному з перерізів, який знаходиться в області значного впливу ЗТН і відповідає розглянутому перерізу № 2, рівень  $J$ -інтеграла досягає 12420 Дж/м<sup>2</sup> при критичному значенні  $J_c = 15400$  Дж/м<sup>2</sup>. Згідно з даними (табл. 2) значення КІН при врахуванні ЗТН може підвищитися приблизно на 40 %, тобто значення  $J$ -інтеграла, отримані в [1], при врахуванні ЗТН можуть бути суттєво вищими ( $J \approx 17000$  Дж/м<sup>2</sup>) за критичне значення. Тобто врахування ЗТН може підвищити консерва-

Таблиця 2. Результати визначення максимальних КІН

Номер перерізу	$\sigma_K(A)$ , МПа	$\sigma_K(C), \sigma_K(B)$ , МПа	$\sigma_K(D)$ , МПа	$K_A$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$K_C, K_B$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$K_D$ , МПа·м <sup>0,5</sup>
Поверхнева напівеліптична тріщина						
1 (без ЗТН)	157,9	364,7	–	43,8	66,1	–
1 (із ЗТН)	76,4	296,5	–	30,6	81,5	–
2 (без ЗТН)	238,1	403,2	–	54,0	58,3	–
2 (із ЗТН)	100,6	294,1	–	35,5	67,5	–
Підповерхнева еліптична тріщина						
1 (без ЗТН)	320,5	83,8	202,2	77,8	24,9	59,1
1 (із ЗТН)	255,2	55,6	155,4	102,2	17,3	74,8
2 (без ЗТН)	284,7	68,6	176,6	52,8	12,2	34,0
2 (із ЗТН)	213,8	45,3	129,6	72,2	3,3	48,0





Рис. 7. Розподіл критичних значень КІН в матеріалі вигородки в момент часу  $t = 100$  с з початку АС

тивність підходу для оцінки ОКР і визначення ресурсу вигородки ВКП.

**Висновки**

Результати проведеного моделювання НДС і оцінки ОКР вигородки ВКП реактора ВВЕР-1000 під час аварійної ситуації режиму великої течі при розриві трубопроводів першого контуру з умовним діаметром 100...850 мм з урахуванням та без урахування ЗТН у вигородці виявили, що:

- у найнебезпечніший момент часу  $t = 100$  с з початку протікання АС у вигородці утворюються досить високі напруження в осьовому напрямку. Урахування ЗТН знижує значення сумарних напружень, але за рахунок їх перерозподілу зона розтягуючих напружень збільшується, що дозволяє збільшити розмір постульованої тріщини і, відповідно, може призвести до підвищення значення КІН;

- підповерхневі еліптичні тріщини є небезпечнішими з точки зору ОКР за поверхневі напівеліптичні тріщини. Урахування ЗТН збільшує значення КІН для підповерхневих еліптичних тріщин у момент часу  $t = 100$  с з початку АС до 40 %.

Таким чином, було виявлено суттєвий вплив ЗТН на опір крихкому руйнуванню вигородки під час АС, що необхідно враховувати при розрахунковому обґрунтуванні продовження терміну експлуатації енергоблоків типу ВВЕР-1000.

**Список літератури/References**

1. Pištora, V., Švrček, M., Ferko, P., Mirzov, I. (2018) Fracture Mechanical Assessment of VVER Reactor Internals.

ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (July 15–20 2018, Prague, Czech Republic). DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2018-84589>

2. Орняк А.І. (2021) *Методи розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень з врахуванням геометричної нелінійності та довільної форми тріщини*: дис. ... канд. техн. наук. 05.02.09, Київ.  
 Orynyak, A.I. (2021) Methods of stress intensity factor calculation allowing for geometrical nonlinearity and arbitrary shape of the crack. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Tekh. Sci. Degree, 05.02.09, Kyiv* [in Ukrainian].

3. Махненко О.В., Кандала С.М. (2022) Розрахункова оцінка опору крихкого руйнування вигородки реактора ВВЕР-1000 в процесі експлуатації з урахуванням залишкових технологічних напружень. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 3, 3–11. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.01>  
 Makhnenko, O.V., Kandala, S.M. (2022) Evaluation of brittle fracture resistance of WVER-1000 reactor baffle during long-term service, taking into account the residual technological stresses. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 3, 3–11 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.01>

4. Makhnenko, O., Kandala, S., Basistyuk, N. (2021) Influence of the heat transfer coefficient on the level of residual stress after heat treatment of the VVER-1000 reactor baffle. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(2), 254–259. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.2.245074>

5. ПМ-Т.0.03.333-15. *Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000*.  
 PM-T.0.03.333-15. *Typical program on evaluation of the technical condition and extension of service life of WVER-1000 reactor internals* [in Russian].

6. Чирков А.Ю. (2020) О корректности известной математической модели радиационного распухания, учитывающей влияние напряжений, в задачах механики упругопластического деформирования. *Проблемы міцності*, 2, 5–22.  
 Chirkov, A.Yu. (2020) On correctness of the known mathematical model of radiation swelling allowing for the effect of stresses in the problems of elastoplastic deformation mechanics. *Problemy Mitsnosti*, 2, 5–22 [in Russian].

7. (2012) *Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации, включая эксплуатацию за пределами проектного срока службы*. РД ЭО 1.1.2.05.0330-2012.  
 (2012) *Guide on strength analysis of equipment and piping of RBMK, WVER and EGP reactor units at the stage of operation including operation beyond the design life*. RD EO 1.1.2.05.0330-2012 [in Russian].

8. (2013) *Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WVER Nuclear Power Plants (VERLIFE)*. Vienna, Int. At. Energy Agency.

INFLUENCE OF RESIDUAL PROCESS STRESSES ON BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF WVER-1000 REACTOR BAFFLE IN CASE OF AN EMERGENCY

O.V. Makhnenko, S.M. Kandala

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [makhnenko@paton.kiev.ua](mailto:makhnenko@paton.kiev.ua), [st\\_kan@ukr.net](mailto:st_kan@ukr.net)

At present, the majority of WVER-1000 reactors in Ukrainian NPPs are going through the procedure of extension of their service life. Reactor internals (RI) are one of the key elements of the structure, which limit the NPP beyond design life. Physical control of RI condition is rather difficult, and even impossible for some areas, so that mathematical modeling is the main method of prediction and analysis of the technical condition. Note that most of the studies in this area are limited to modeling the normal operation mode, but the project also envisages emergency situations (ES), characterized by a rather abrupt change of boundary conditions and loads that promotes formation of quite high stresses. The work analyzes how the residual process stresses generated during RI baffle manufacture, can affect the values of stress intensity factor on the contour of postulated cracks during ES. A significant influence of RPS on the baffle brittle fracture resistance during ES was revealed that should be taken into account at calculation-based substantiation of extension of service life of WVER-1000 type power units. 8 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

*Keywords: WVER-1000, reactor internals, baffle, residual process stresses, emergency situation, crack-like defect, stress intensity factor*

Надійшла до редакції 09.09.2022