

# Узагальнення результатів робіт з оцінки технічного стану та продовження строку експлуатації деталей головного ущільнення реактора ВВЕР-1000 енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС

- **Черняк Ярослав Петрович**, канд. техн. наук  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1342-5679>
- **Шугайло Олексій Петрович**, канд. техн. наук  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-7830>
- **Брік Дмитро Семенович**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-1802>
- **Кузнецова Христина Валеріївна**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9509-8711>
- **Демешко Володимир Олександрович**  
Відокремлений підрозділ «Запорізька атомна електрична станція»  
Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»,  
м. Енергодар, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8319-8398>

Умови експлуатації деталей головного ущільнення реактора призводять до того, що механічні властивості шпильки з часом змінюються та розподіляються по довжині нерівномірно. Такий розподіл механічних властивостей потребує врахування під час оцінки міцності головного ущільнення реактора і безпосередньо самої шпильки. У цій статті проаналізовано досвід виконання робіт з оцінки технічного стану деталей головного ущільнення реактора енергоблоків № 1 – 4 Відокремленого підрозділу «Запорізька атомна електростанція» під час переходу до довгострокової експлуатації з урахуванням результатів проведених державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки. Розглянуто узагальнені відомості щодо впливу експлуатаційних факторів на властивості металу деталей головного ущільнення реактора ВВЕР-1000. Проаналізовано необхідність урахування змін властивостей металу деталей вузла головного ущільнення реактора під час їх розрахункових обґрунтувань міцності та вплив цих факторів на формування заходів з управління старінням.

Ключові слова: деталі головного ущільнення реактора, довгострокова експлуатація, заходи з управління старінням, механічні властивості, оцінка технічного стану, розрахункові обґрунтування міцності.

© Черняк Я. П., Шугайло О-й П., Брік Д. С., Кузнецова Х. В., Демешко В. О., 2021

Продовження строку експлуатації (ПСЕ) елементів і конструкцій АЕС на сьогодні – вже ustalена практика, яка є загальноприйнятною в усьому світі й ефективно застосовується протягом останніх двох десятиліть. Під час виконання робіт з ПСЕ елементів і конструкцій АЕС та переходу до довгострокової експлуатації ядерних установок Україною накопичено унікальний досвід і практику виконання робіт з оцінки технічного стану (ОТС) та ПСЕ для різних проєктів реакторних установок водо-водяних енергетичних реакторів (ВВЕР). Цей досвід, практика та вивчені уроки докладно описані в роботах [1]-[4]. У роботі [3] зокрема зазначається, що питання забезпечення міцності елементів і конструкцій стає одним із основних, особливо в тих випадках, коли заміна таких елементів неможлива або недоцільна. Здебільшого обґрунтування міцності елементів і конструкцій є можливим завдяки запасам міцності, закладеним у вихідний проєкт, та впровадженню відповідних заходів з управління старінням (УС), які формуються за результатами оцінки поточного технічного стану елемента, конструкції з урахуванням прогнозного строку їх експлуатації. Одним із елементів, який потребує підвищеної уваги, є деталі головного ущільнення реактора (ГУР). До елементів ГУР належать шпилька, гайка, шайба увігнута, шайба випукла. Відповідно до ТУ 108-11-492-80 [5] строк служби деталей ГУР складає 30 років і, по суті, вони можуть бути замінені після завершення цього строку. Водночас, як показує досвід експлуатації та результати ОТС, поточний технічний стан деталей ГУР свідчить про можливість їх подальшої експлуатації, за умови впровадження відповідних заходів з УС. Утім, умови експлуатації деталей ГУР призводять до того, що механічні властивості шпильки з часом змінюються і розподіляються по довжині нерівномірно. Такий розподіл механічних властивостей під час оцінки потребує врахування міцності деталей вузла ГУР та безпосередньо самої шпильки.

Нижче наведені основні результати аналітичних досліджень причин та наслідків зміни механічних

властивостей та оцінено їх вплив на прогнозний строк експлуатації (на прикладі робіт, виконаних для енергоблоків № 1 – 4 Відокремленого підрозділу «Запорізька атомна електростанція» (ВП ЗАЕС)).

### 1 Загальні відомості, актуальність, особливості конструкції та експлуатації деталей ГУР

Для обґрунтування можливості ПСЕ деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС розроблено та погоджено з Державною інспекцією ядерного регулювання України (Держатомрегулювання) документ «Рабочая программа оценки технического состояния и продления срока эксплуатации деталей уплотнения главного разъема реактора энергоблоков №№ 1, 2, 3, 4 ОП ЗАЭС» 1234.РО.УС.ПМ.275-17/Н [6], який визначає процедуру, обсяг, методи і засоби ОТС комплектів деталей ГУР на підставі вимог: НП 306.2.141-2008 [7], НП 306.2.099-2004 [8], ПНАЭ Г-7-002-86 [9], ПНАЭ Г-7-008-89 [10], ПМ-Д-0.08.222-14 [11], НП 306.2.208-2016 [12], СТП 0.41.076-2008 [13], ПМ-Т.0.03.061-13 [14].

**Примітка:** На час написання статті документи «ПМ-Д-0.08.222-14. Типовая программа по управлению старением элементов энергоблока АЭС» та «ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» втратили чинність. У цій статті ПМ-Д-0.08.222-14 та ПНАЭ Г-7-008-89 використано як джерело інформації.

Відповідно до вимог НП 306.2.141-2008 [7] деталі ГУР належать до 1 класу безпеки і є елементами нормальної експлуатації. Класифікаційне позначення – 1Н. Відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-008-89 [10] деталі ГУР належать до групи А і до I категорії сейсмостійкості за НП 306.2.208-2016 [12].

Вузол ГУР комплектується деталями (шпилька, гайка, шайба увігнута, шайба випукла, див. Таблицю 1 та Рисунки 1 – 4), що виготовляються за ТУ 108-11-492-80 [5].

Таблиця 1 – Комплект деталей вузла ГУР

№ п/п	Найменування елемента	Технологічне позначення, кресленик	Марка матеріалу ГОСТ 4543-71 [15]	Клас міцності ДСТУ ГОСТ 23304:2012 [16]	Кількість
1	Шпилька	1117.02.13.020	Сталь 38ХНЗМФА	КП 880	54
2	Гайка	1117.02.13.004			54
3	Шайба випукла	1117.02.13.005			54
4	Шайба увігнута	1117.02.13.006			54

Параметрами технічного стану деталей ГУР відповідно до вимог Робочої програми [6] є:

значення механічних властивостей основного металу, а саме: межа плинності, межа міцності, відносне звуження, відносне подовження, ударна в'язкість (далі – [П1]);

якість (стан) основного металу (далі – [П2]);

геометричні розміри (далі – [П3]);

кількість циклів навантаження (далі – [П4]);

накопичена втомна пошкоджувальність (далі – [П5]);

розміри і характеристики елементів конструкції, такі як: товщина металу, деформація, механічне пошкодження, виявлені під час зовнішнього огляду тощо (далі – [П6]).

Критеріями параметрів технічного стану є:

для параметра [П1] – відповідність фактичних значень вимогам нормативно-технічної, проєктної документації, паспорту, ТУ;

для параметра [П2] – відповідність фактичного стану металу вимогам документів за нормами оцінки якості;

для параметра [П3] – відповідність фактичних геометричних розмірів елементів вимогам проєктної конструкторської документації;

для параметра [П4] – неперевиконана допустима кількість циклів навантаження, встановлена в проєктній та експлуатаційній документації.

У разі перевищення допустимих значень циклів навантаження та виконання критерію для параметра [П5] необхідно виконати обґрунтоване перепризначення допустимих значень циклів навантаження;

для параметра [П5] – неперевиконані допустимі значення накопиченого втомного пошкодження на момент закінчення ПСЕ;

для параметра [П6] – неприпустимі деформації та пошкодження, які неможливо усунути, або які є неприпустимими з огляду на умови міцності, забезпечення виконання деталями вузла ГУР своїх функцій у повному обсязі відповідно до вимог проєктної, конструкторської та експлуатаційної документації.

Параметрами граничних станів деталей ГУР визначені такі:

механічні властивості основного металу;

деформації та пошкодження елементів.

Критеріями граничних станів деталей ГУР є:

зниження показників міцності та пластичності матеріалу до значень, за яких подальша безпечна експлуатація деталей вузла ГУР неможлива;

деформації та пошкодження, які неможливо усунути, або які є неприпустимими з огляду на умови міцності, забезпечення виконання деталями вузла ГУР реактора своїх функцій, вимоги проєктної, конструкторської та експлуатаційної документації.

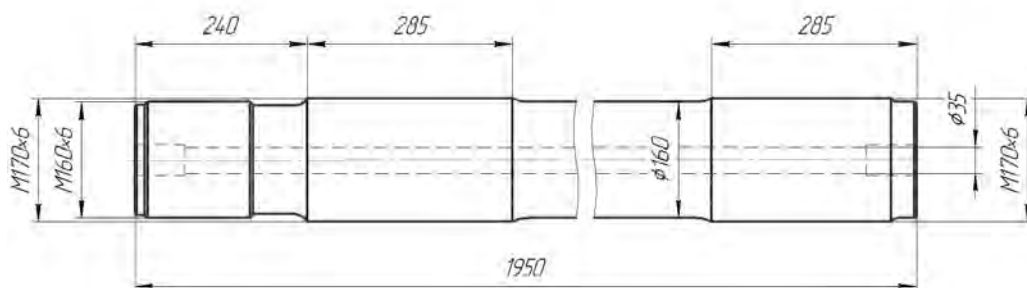


Рисунок 1 – Шпилька

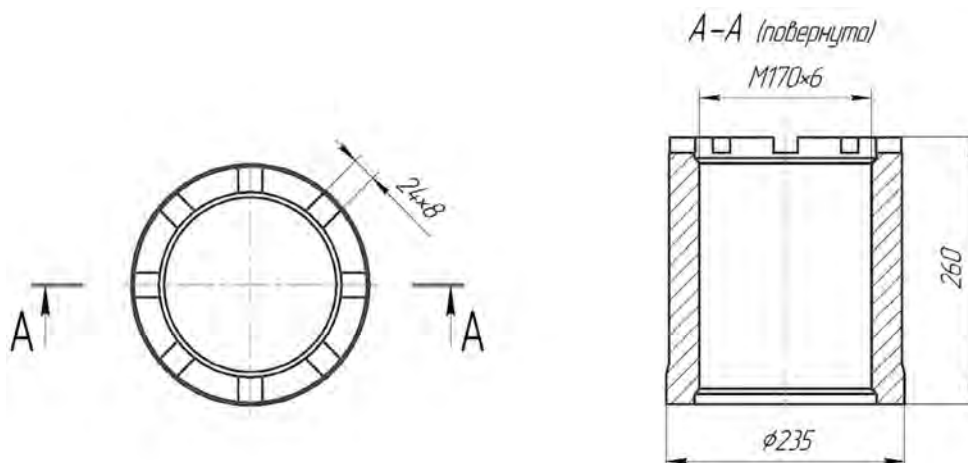


Рисунок 2 – Гайка

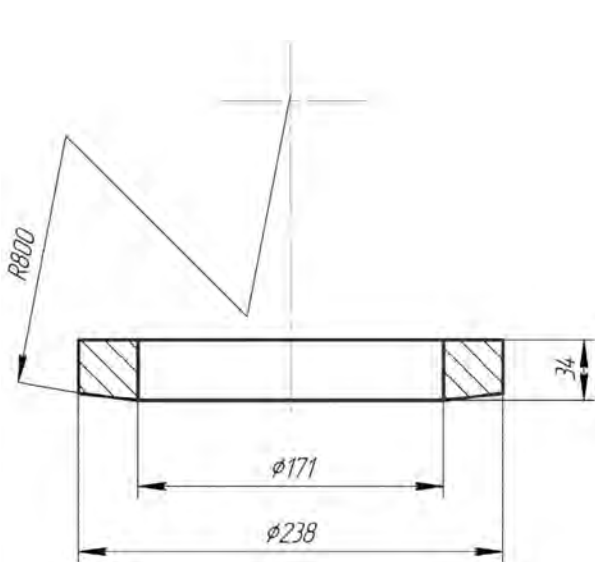


Рисунок 3 – Шайба випукла

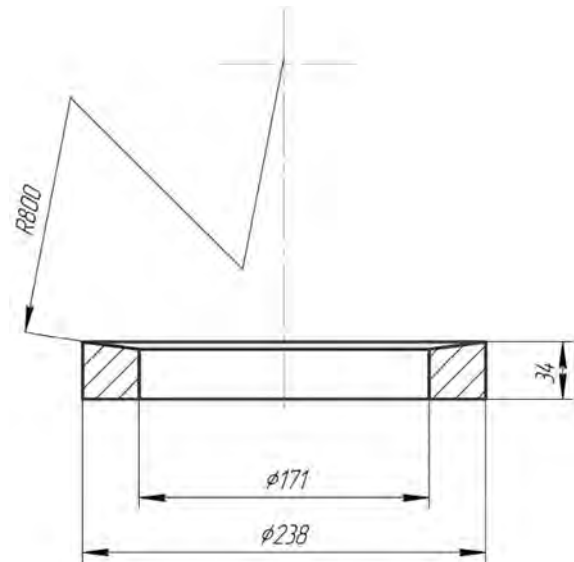


Рисунок 4 – Шайба увігнута

Під час виконання ОТС деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС підтверджено, що одним з визначальних параметрів технічного стану деталей ГУР, який впливає на обґрунтованість ухвалення рішення про можливість ПСЕ та на формування вихідних даних у процесі обґрунтування міцності деталей ГУР, є механічні властивості основного металу [П1].

## 2 Оцінка механічних властивостей основного металу деталей ГУР

Деталі ГУР виготовлені відповідно до вимог ГОСТ 23304-78 [16] зі сталі 38ХНЗМФА за ГОСТ 4543-71 [15]. Цими стандартами встановлені вимоги до хімічного складу, режимів термообробки та механічних властивостей матеріалу деталей ГУР, що за категорією міцності належать до КП 880.

Сталь 38ХНЗМФА, у цій категорії міцності після загартування 850 – 880 °С (масло або вода) і високого відпускання 600 – 680 °С (повітря), згідно з вимогами ГОСТ 23304-78 [16] і ПНАЭ Г-7-002-86 [9], повинна відповідати значенням механічних властивостей, наведених у Таблиці 2.

Фактичні механічні характеристики основного металу шпильок, гайок і шайб енергоблока № 2 ВП ЗАЕС, зафіксовані під час виготовлення деталей ГУР та наведені в їх паспортах (Таблиця 3), відповідали вимогам ГОСТ 23304-78 [16] і ПНАЭ Г-7-002-86 [9].

Під час виконання ОТС деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС оцінка зміни механічних властивостей основного металу деталей ГУР проводилась прямими та непрямими методами. Для дослідження обрані деталі ГУР енергоблоків № 1, 2 ВП ЗАЕС, що мають найбільше напруження, та результати яких можуть бути розповсюджені на енергоблоки № 1 – 4 ВП ЗАЕС.

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі 38ХНЗМФА для категорії міцності КП 880 згідно з вимогами ГОСТ 23304-78 [16] і ПНАЭ Г-7-002-86 [9]

Характеристика	ГОСТ 23304-78[16]		ПНАЭ Г-7-002-86[9]	
	Температура, °С			
	20	350	20	350
Межа міцності $\sigma_b (R_m^T)$ , МПа	980	—	981	834
Межа плинності $\sigma_T (R_{p0,2}^T)$ , МПа	882-1078	735 (75)	880	746
Відносне подовження $\delta_5 (A^T)$ , %	11	—	11	11
Відносне звуження $\psi (z^T)$ , %	35	—	35	40
Ударна в'язкість КСУ, Дж/см <sup>2</sup> (кгс·м/см <sup>2</sup> )	59 (6,0)	—	—	—
Твердість, НВ	277...352	—	—	—

Таблиця 3 – Фактичні механічні характеристики основного металу шпильки, гайки і шайб енергоблока № 2 ВП ЗАЕС.

Номер деталі	T=20 °C					T=350 °C
	Межа міцності	Межа плинності	Відносне зрушення	Ударна в'язкість, кгс·м/см <sup>2</sup>		Межа плинності
				KCU	KCV	
$\sigma_{B'}$ МПа	$\sigma_{0,2'}$ МПа	у	тип I	тип II	$\sigma_{0,2'}$ МПа	
Шпилька	1023	894	57,7	11,9	10,4	739
	1008	902	57,7	11,4	10,5	749
				11,6	9,5	
Гайка	989	861	57,5	8,9	6,9	726
	999	863	58,7	9,6	7,4	730
				8,6	7,9	
Шайба випукла	1090	932	56,2		10,6	764
	1089	972	53,8		9,2	745
	1108	965	56,0	—	8,6	801
	1093	941	56,3		9,1	804
					9,4	
					8,9	
Шайба увігнута	1056	917	62,3	12,1		777
	1056	954	32,1	11,4		777
	1060	927	64,9	12,8	—	775
	1040	923	66,9	10,1		771
			13,1			
			13,1			

До прямого методу належить визначення механічних властивостей металу деталей ГУР руйнівними методами. Дослідження зразків руйнівними методами передбачало вирізку контрольних зразків для визначення механічних властивостей і структури металу. Застосовувалися п'ять типів зразків для визначення механічних характеристик ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ ,  $Z$ ,  $R^{350}_m$ ,  $R^{350}_{p0,2}$ ,  $A^{350}$ ,  $Z^{350}$ , KCV). Випробування для визначення механічних властивостей для температури 20 °C відбувалися згідно з ГОСТ 1497-84 [17], випробування механічних властивостей для температури 350 °C за ГОСТ 9651-84 [18], визначення ударної в'язкості за ГОСТ 9454-78 [19]). Один тип зразків використано для металографічних досліджень.

Зразки для випробувань основного матеріалу шпильки виготовлялись із зовнішнього та внутрішнього шарів та для трьох зон вирізки за схемою вирізки, наведеною на Рисунку 5, а для основного матеріалу гайки за схемою вирізки, наведеною на Рисунку 6.

Результати випробувань (середні значення) механічних властивостей зовнішнього та внутрішнього шару основного металу шпильки та гайки наве-

дені в Таблицях 4 та 5 (зони вирізки зразків з основного металу шпильки далі у тексті позначаються, як «Верхня різьба» – різьба, на яку накручується гайка, «Середня частина» – основний метал шпильки, «Нижня різьба» – різьба, яка вкручується у фланець).

Порівняльний аналіз межа плинності основного металу шпильок, отриманої руйнівними методами та регламентованої технічною та конструкторською документацією, наведено на Рисунку 7. Результати випробувань та графічна інтерпретація результатів свідчить про таке:

характеристики основного металу верхньої, середньої та нижньої частин різьби шпильок мають чітко виражену тенденцію до зниження механічних властивостей під час експлуатації від верхньої до нижньої частин шпильки;

значення межі плинності в середній та нижній частинах знижується до рівня, що не задовольняє вимоги ПНАЭ Г-7-002-86 [9] щодо мінімально гарантованих значень механічних властивостей сталі 38ХНЗМФА для категорії міцності КП 880;

механічні характеристики зовнішнього шару шпильок є вищими за механічні характеристики внутрішнього шару.



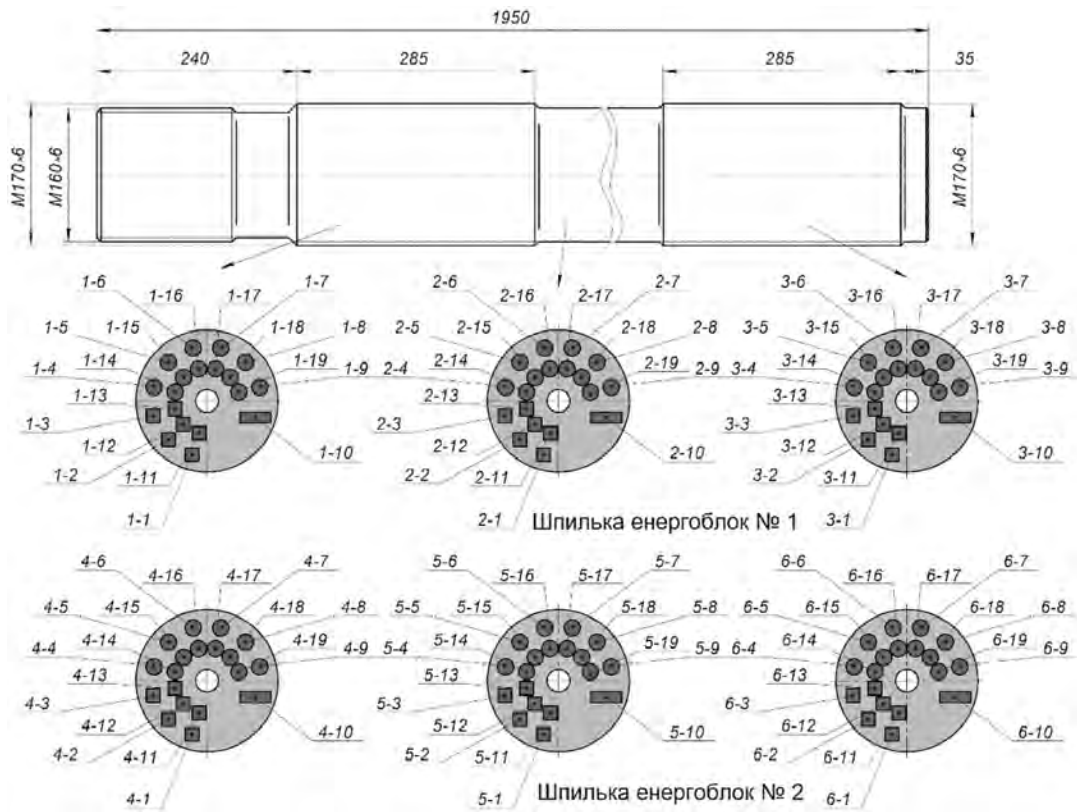


Рисунок 5 – Схема вирізки зразків із шпильки

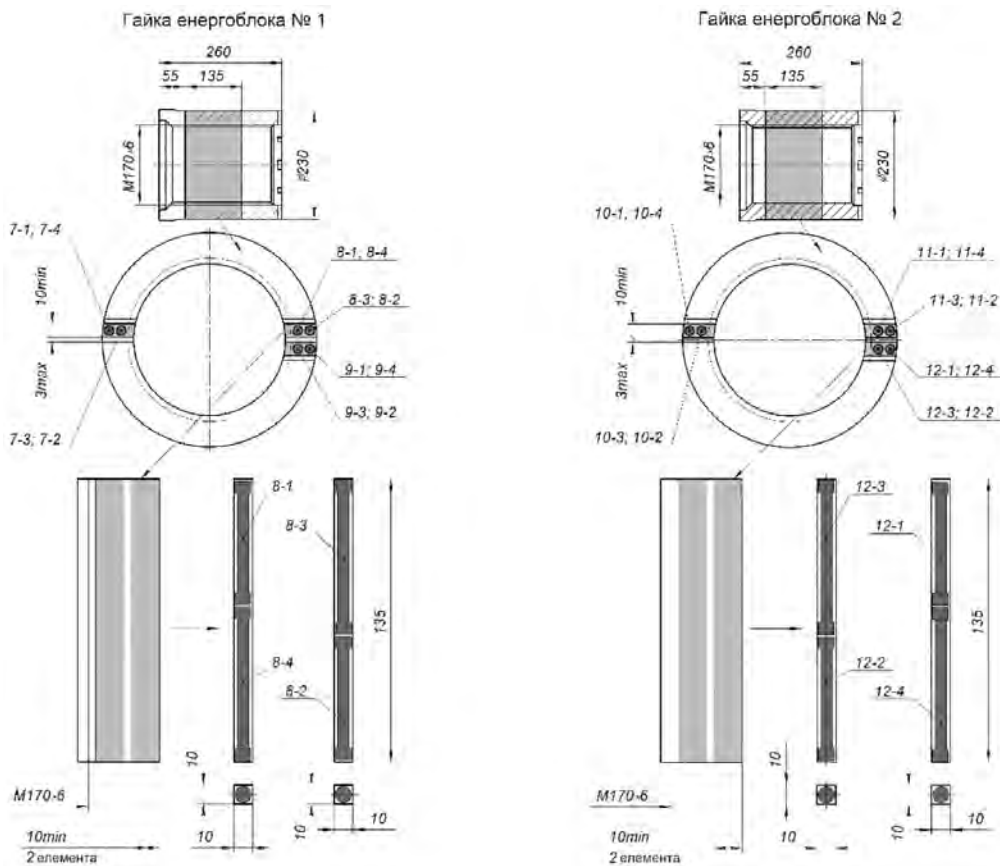


Рисунок 6 – Схема вирізки зразків з гайки

Таблиця 4 – Результати випробувань механічних властивостей основного металу шпильки (зовнішній шар) та гайки

Елемент	T, °C	R <sub>m</sub> , МПа	R <sub>p0.2</sub> , МПа	A, %	Z, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Енергоблок № 1						
Верхня різьба шпильки	20	1016	902	17,4	59,4	108
	350	890	768	18,3	57,4	—
Середня частина шпильки	20	996	881	16,0	60,0	115
	350	872	742	18,4	59,5	—
Нижня різьба шпильки	20	950	842	15,0	60,9	116
	350	853	741	20,5	55,2	—
Гайка	20	1060	949	15,7	54,5	—
	350	851	752	16,0	52,3	—
Енергоблок № 2						
Верхня різьба шпильки	20	1008	910	16,9	60,6	108
	350	866	754	17,8	57,5	—
Середня частина шпильки	20	982	860	17,3	61,1	113
	350	884	765	19,3	61,8	—
Нижня різьба шпильки	20	947	831	16,2	61,4	113
	350	838	735	16,2	57,5	—
Гайка	20	1081	955	17,5	54,7	—
	350	867	766	15,0	48,7	—

Таблиця 5 – Результати випробувань механічних властивостей основного металу шпильки (внутрішній шар)

Елемент	T, °C	R <sub>m</sub> , МПа	R <sub>p0.2</sub> , МПа	A, %	Z, %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
Енергоблок №1						
Верхня різьба шпильки	20	1008	894	14,6	59,9	109
	350	880	756	18,7	50,6	—
Середня частина шпильки	20	982	868	15,2	59	117
	350	868	739	19,0	56,9	—
Нижня різьба шпильки	20	950	842	15	60,9	119
	350	846	737	18,3	59,8	—
Енергоблок №2						
Верхня різьба шпильки	20	990	887	16,4	59,3	107
	350	852	750	16,2	56,4	—
Середня частина шпильки	20	955	842	15,1	60,2	115
	350	838	735	18,0	58,3	—
Нижня різьба шпильки	20	939	821	16,9	61,4	115
	350	836	734	18,3	59,2	—

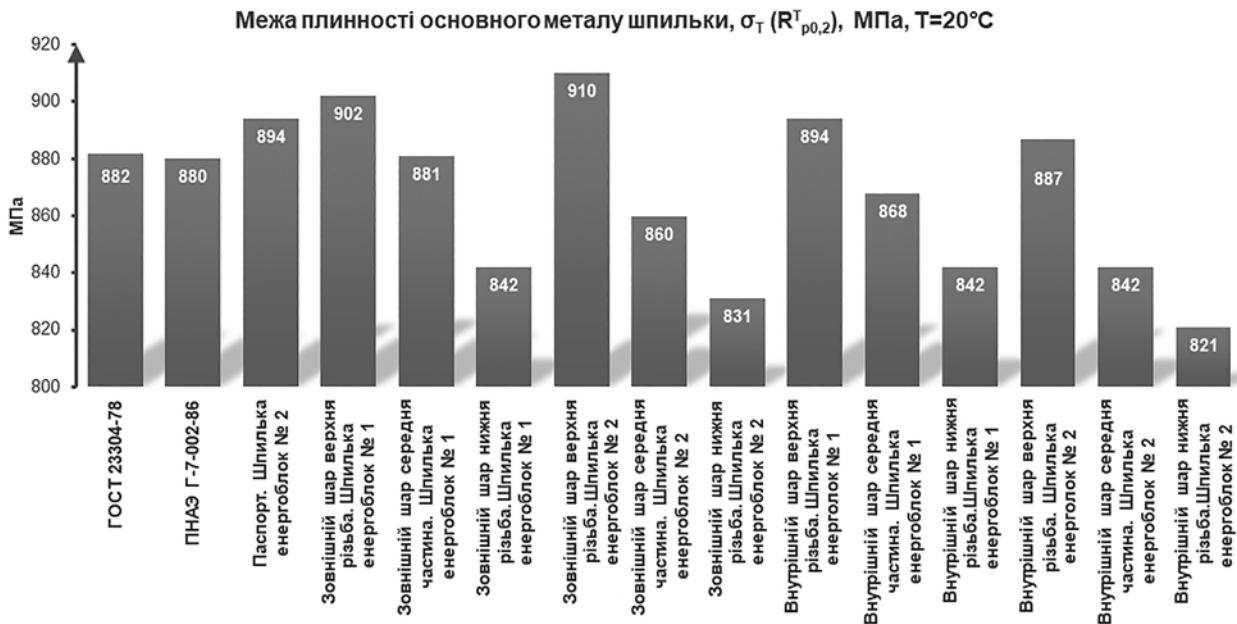


Рисунок 7 – Межа плинності основного металу шпильок

Аналіз результатів випробувань дає підстави стверджувати, що така ситуація може траплятися через умови експлуатації шпильки. Геометрична модель деталей ГУР наведена на Рисунку 8.

З Рисунку 8 видно, що нижня частина шпильки має безпосередній контакт із корпусом реактора і в цьому місці відсутні зазори, відповідно, відсутнє відведення тепла через повітря. Середня частина не має безпосереднього контакту з корпусом реактора і в цьому місці наявний повітряний зазор, завдяки якому

відбувається незначне відведення тепла через вільну конвекцію повітря. Верхня частина шпильки вільна і постійно охолоджується до температури навколишнього середовища завдяки примусовій циркуляції повітря.

Отже, через ці конструктивні особливості вплив на різні частини шпильок експлуатаційних факторів відрізняється, що призводить до поступової зміни механічних властивостей у зонах та у шарах шпильки.

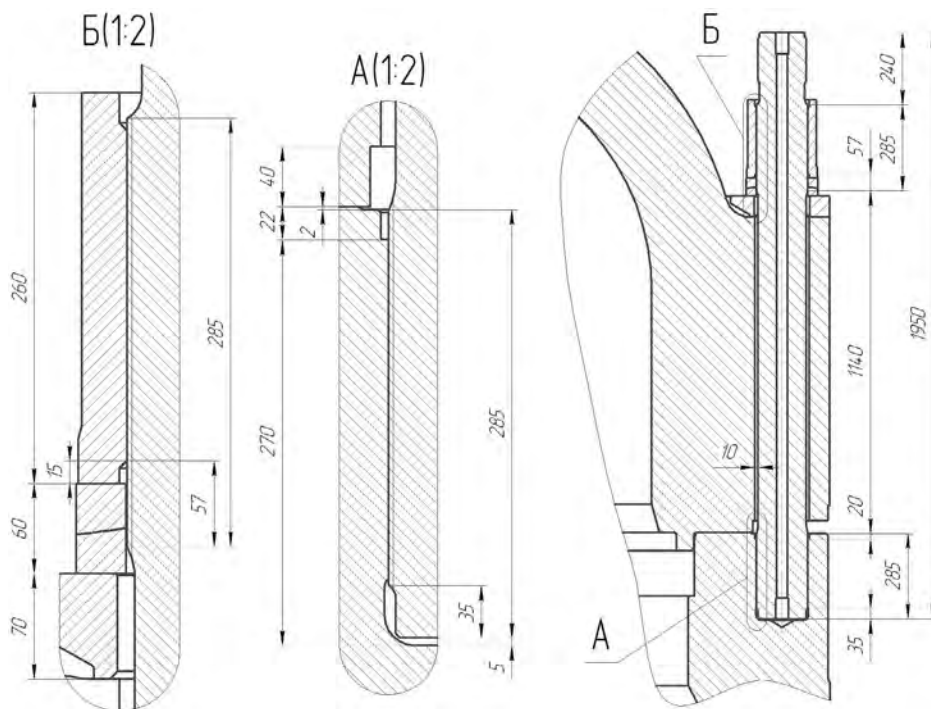


Рисунок 8 – Геометрична модель деталей ГУР



До експлуатаційних факторів, що впливають або можуть вплинути на характеристики основного металу деталей ГУР, належать такі як температура та циклічні навантаження (зтяг, розігрів, розхолодження, випробування).

Різниця між механічними характеристиками зовнішнього та внутрішнього шару шпильок зумовлена технологічними факторами виготовлення шпильок.

Згідно з відомостями ГОСТ 4543-71 [15] гарантовані механічні властивості для сталі 38ХНЗМФА, що пройшла термічну обробку, забезпечуються для перетину діаметром 25 мм. Тобто для шпильки діаметром 170 мм вимоги для категорії міцності КП 880 будуть зберігатися лише на глибині до 25 мм, а ближче до центру шпильки механічні властивості металу шпильки поступово зменшуються.

Зниження механічних властивостей шпильок та різниця механічних характеристик зовнішнього та внутрішнього шару шпильок підтверджується також непрямыми методами визначення механічних властивостей за вимірами твердості.

Виміри твердості виконувались у десяти точках, рівномірно розташованих за перетином шпильки (Таблиця 6, Рисунок 9).

Значення механічних властивостей металу за результатами вимірів твердості шпильок розраховувались відповідно до методики наведеної в СОУ-Н НАЕК 133:2016 [20] (Таблиця 7 та Рисунок 10).



Рисунок 9 – Схема вирізки зразків та розташування контрольних точок для вимірів твердості за перетином шпильки

Таблиця 6 – Значення твердості металу шпильок ГУР

Шпилька	Значення твердості НВ у точках (Рисунок 9)										Серед.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
№ 1	292	302	294	301	305	302	302	301	302	304	301
№ 2	288	294	292	299	300	298	300	298	298	301	297

Таблиця 7 – Результати розрахунку механічних властивостей металу шпильки

№ точки	$R_{m,r}$ МПа	$R_{p0.2,r}$ МПа	A, %	Z, %	$R_{m,r}$ МПа	$R_{p0.2,r}$ МПа	A, %	Z, %
Шпилька № 1				Шпилька № 2				
1	903	811	16	62	889	797	16	62
2	936	847	15	61	910	818	16	62
3	910	818	16	62	903	811	16	62
4	933	843	15	61	927	836	16	61
5	947	858	15	60	930	840	16	61
6	936	847	15	61	923	833	16	61
7	936	847	15	61	930	840	16	61
8	933	843	15	61	923	833	16	61
9	936	847	15	61	923	833	16	61
10	944	854	15	61	933	843	15	61

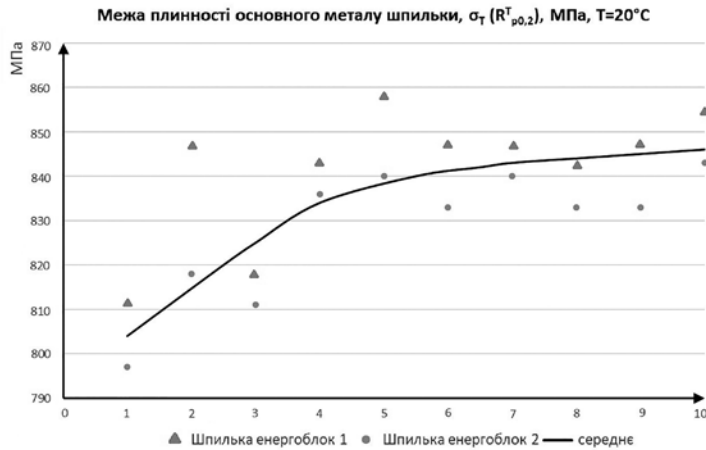


Рисунок 10 – Зміни механічних властивостей металу шпильки (точка 1 – центр шпильки, точка 10 – зовнішня поверхня шпильки, див. Рисунок 9).

Грунтуючись на отриманих результатах дослідження механічних властивостей основного металу деталей ГУР ВП ЗАЕС проведені розрахунки міцності відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-002-86 [9] з урахуванням фактичних механічних характеристик металу деталей ГУР та його старіння (див. [21]). Під час проведення розрахунків міцності деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС враховані прогнозні значення механічних властивостей металу деталей ГУР протягом їх продовженої експлуатації, що отримані під час побудови трендів їх змін, які ґрунтувались на отриманих фактичних даних щодо механічних властивостей металу шпильок енергоблоків № 1 та 2. Наприклад, прогноз механічних характеристик шпильок енергоблока № 3 ВП ЗАЕС виконувався з огляду на паспортні дані шпильок (за середнім значенням), деградацією для температур 20 °С та 350 °С обрана найбільш консервативна деградація для відповідної температури для блоків № 1 та 2 ВП ЗАЕС з урахуванням розкиду даних (як односторонні оцінки нижніх огинаючих з довірчим інтервалом 95 %), а саме:

максимальна різниця для всіх зон і шарів між межами плинності за кімнатної температури для початкового стану і прогнозом на 60 років складає 165,19 МПа;

Таблиця 8 – Фактичні дані межі плинності, що застосовувались у розрахунках міцності шпильок енергоблока № 3 ВП ЗАЕС

T, °C	Строк експлуатації, рік				
	0	30	40	50	60
20	967,8	885,2	857,6	830,1	802,6
125	903,0	843,4	823,6	803,7	783,9
320	782,8	765,9	760,3	754,7	749,1
350	764,3	754,0	750,6	747,2	743,8

максимальна різниця для всіх зон і шарів між межами плинності за температури 350 °С для початкового стану і прогнозом на 60 років складає 20,49 МПа;

максимальна різниця для всіх зон і шарів між межами міцності за кімнатної температури для початкового стану і прогнозом на 60 років складає 167,32 МПа.

На Рисунку 11 наведено тренд зміни межі плинності та у Таблиці 8 фактичні дані межі плинності, що застосовувались у розрахунках міцності деталей ГУР енергоблока № 3.

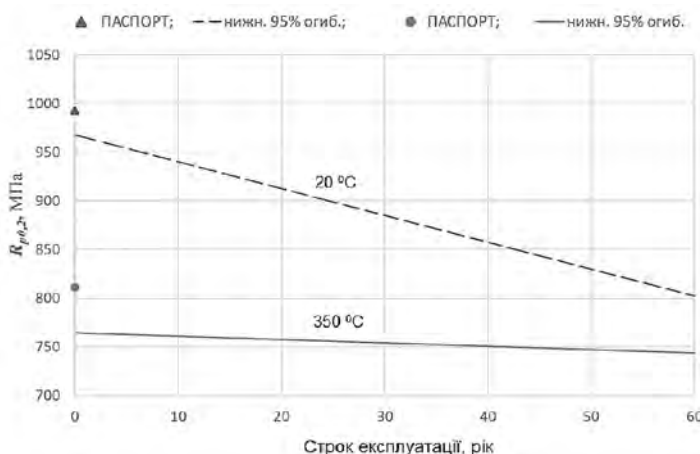


Рисунок 11 – Тренд межі плинності шпильки енергоблока № 3 ВП ЗАЕС

Через відсутність даних початкового стану для межі міцності металу деталей ГУР за температури 350 °С прогнозування її зміни не можливе. Для блока № 3 для всіх строків експлуатації значення межі міцності за температури 350 °С прийнято консервативно (з погляду подальших оцінок циклічної міцності) – відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-002-86 [9] для сталі 38ХНЗМФА категорії міцності КП 785, а саме 746 МПа.

Зазначений вище підхід погоджено Держатомрегулюванням для обґрунтування міцності деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС на період їх довгострокової експлуатації. За результатами розрахунків обґрунтовано можливість безпечної експлуатації деталей ГУР. Водночас, ці розрахунки було виконано без урахування напружень, спричинених окремими умовами експлуатації шпильок ГУР, а саме без урахування впливу наявного зазору між отвором у фланці кришки реактора та шпилькою (Рисунок 8). Наявність зазору призводить до різних теплових умов роботи шпильки та фланця кришки під час протікання режимів розігріву та розхолодження реакторної установки, що призводить до виникнення додаткових напружень. Коректне вирішення теплової задачі під час розрахунків міцності деталей ГУР потребує уточнення підходів до визначення граничних умов та умов теплообміну в зазорі між отвором у фланці кришки реактора та шпилькою і під тепловою ізоляцією кришки реактора.

Ґрунтуючись на результатах ОТС та висновках державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки для енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС (див. Звіт № 18-09-10812 [22]) розроблені відповідні заходи з УС, а саме:

оцінка впливу повітряного зазору «шпилька – фланці корпусу та кришки реактора» на міцність шпильок;

виконання вимірів твердості з метою відстеження тренду їх змін;

рішення щодо необхідності додаткових випробувань шпильок руйнівними методами ухвалити з урахуванням отриманих результатів міцнісних розрахунків, що враховують вплив повітряного зазору.

## Висновки

У статті розглянуто підходи до визначення параметрів технічного стану та параметрів, що визначають граничний стан деталей ГУР під час виконання ОТС деталей ГУР енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС і підтверджено визначальний вплив параметра граничного стану механічної властивості основного металу на можливість продовження строку їх експлуатації та на формування вихідних даних під час обґрунтування міцності деталей ГУР. Розглянуто практичний досвід обґрунтування безпечної

експлуатації деталей ГУР за таким параметром граничного стану як механічні властивості.

Надана оцінка змін механічних властивостей основного металу деталей ГУР, що проводилась прямими та непрямими методами, на прикладі дослідження деталей ГУР енергоблоків № 1, 2 ВП ЗАЕС, що мають найбільше напруження, та результати яких поширені на енергоблоки 1 – 4 ВП ЗАЕС. Аналіз відомостей звітів з ОТС енергоблоків № 1 – 4 ВП ЗАЕС свідчить про таке:

механічні властивості основного металу середньої частини та нижньої різьби шпильок під час експлуатації знижуються до значень, які не задовольняють вимоги ПНАЭ Г-7-002-86 [9] щодо рівня мінімально гарантованих механічних властивостей сталі 38ХНЗМФА для категорії міцності КП 880; механічні характеристики зовнішнього шару шпильок вищі ніж внутрішнього.

Установлено, що найбільш вірогідними причинами, що призводять до зміни механічних властивостей основного металу деталей ГУР є такі:

вплив експлуатаційних факторів (температури, циклічних навантажень, напружень від робочого тиску тощо);

вплив технологічних факторів під час виготовлення.

Визначені підходи щодо обґрунтування міцності деталей ГУР, які враховують прогнозні значення механічних властивостей металу деталей ГУР протягом їх понадпроектної експлуатації, отримані під час побудови трендів їх змін, які ґрунтувались на отриманих фактичних даних щодо механічних властивостей металу шпильок енергоблоків № 1 та 2 ВП ЗАЕС. За результатами досліджень розроблені відповідні заходи з УС (оцінка впливу повітряного зазору, виконання вимірів твердості, додаткові випробування шпильок руйнівними методами).

## Список використаної літератури

1. Шугайло А-й П., Шугайло А-р П., Рыжов Д. И., Крицкий В. Б., Романов С.В., Колупаев А. М. Рекомендации по совершенствованию национальной нормативной базы в части продления срока эксплуатации и управления старением энергоблоков АЭС Украины. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2013, № 3(59). С. 3–9.
2. Шугайло О.П., Плачков Г.І., Гребенюк Ю.П., Шевченко І. А., Дибач О. М., Зелений О. В., Москалішин Р.І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2018, № 3(79). С. 3–9. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).01.
3. Шугайло Ол-й П., Гребенюк Ю.П., Зелений О. В., Рыжов Д. І., Шугайло Ол-р П., Брік Д. С., Черняк Я. П.

Отриманий досвід та вивчені уроки щодо діяльності з переходу енергоблоків АЕС України до довгострокової експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1(85). С. 15–28. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).02.

4. Шугайло О-й П., Лігоцький О. І., Печериця О. В., Кульман О. М., Москалішин Р. І., Халенко Р. В., Курман О. М. Результати аналізу подій на АЕС України, спричинених старінням. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 2(86). С. 44–51. doi: 10.32918/nrs.2020.2(86).06.

5. ТУ 108-11-492-80 Детали главного уплотнения 1117.02.13.000. Технические условия.

6. Рабочая программа оценки технического состояния и продления срока эксплуатации деталей уплотнения главного разьема реактора энергоблоков №№ 1, 2, 3, 4 ОП ЗАЭС. 1234.РО.УС.ПМ.275-17/Н.

7. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 № 162, зареєстр. в М-ві юстиції України від 25.01.2008 за № 56/14747.

8. НП 306.2.099-2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. Затвердж. наказом Держатомрегулювання України від 26.11.2004 № 181, зареєстр. в М-ві юстиції України від 15.12.2004 за N 1587/10186.

9. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

10. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

11. ПМ-Д-0.08.222-14. Типовая программа по управлению старением элементов энергоблока АЭС.

12. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 17.10.2016 № 175, зареєстр. в М-ві юстиції України 07.11.2016 за № 1449/29579.

13. СТП 0.41.076-2008. Анализ и оценка безопасности. Порядок использования расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных энергетических установок. Методические указания. Затвердж. наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 02.12.2008 № 1181-р.

14. ПМ-Т.0.03.061-13. Типовая программа периодического контроля состояния основного металла, сварных соединений и наплавов оборудования и трубопроводов атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000 (ТППК-13).

15. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.

16. ДСТУ ГОСТ 23304:2012 (ГОСТ 23304-78, IDT). Болты, шпильки, гайки и шайбы для фланцевых соединений атомных энергетических установок. Технические требования. Приемка. Методы испытаний. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

17. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Металлы. Методы испытания на растяжение.

18. ГОСТ 9651-84 (ИСО 783-89). Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах.

19. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

20. СОУ-Н НАЕК 133:2016. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Методика визначення механічних властивостей металу за результатами випробувань на твердість. Затвердж. наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 21.06.2017 № 523.

21. Расчетное обоснование возможности переназначения срока службы деталей узла уплотнения ДГУ энергоблоков №№1, 2, 3, 4 ОП ЗАЭС с учетом фактических механических свойств материала и его старения.

22. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки документа «Отчет. Оценка технического состояния деталей узла уплотнения ГПП энергоблоков №№ 1, 2, 3, 4 ОП ЗАЭС на основании результатов испытаний образцов» (Звіт № 18-09-10812).

## References

1. Shugailo, O., Shugailo, O-r, Ryzhov, D., Kritsky, V., Romanov, S., Kolupaev, A. (2013). Recommendations for improvement of national regulations on long-term operation and ageing management of Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(59), 3-9.

2. Shugailo, A., Plachkov, G., Grebenyuk, Yu., Shevchenko, I., Dybach, O., Zelenyi, O., Moskalysyn, R. (2018). The main results of ageing management state analysis of Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(79), 3-9. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).01.

3. Shugailo, O., Grebenyuk, Yu., Zelenyi, O., Ryzhov, D., Shugaylo, O-l-r, Brik, D., Cherniak, Ya. (2020). Experience obtained and lessons learnt from the transition of Ukrainian NPPs to long-term operation. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(85), 15–28. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).02.

4. Shuhailo, O-i, Ligotsky, O., Pecherytsia, O., Kulman, O., Moskalysyn, R., Khalenko, R., Kurman, O. (2020). Results of analysis of ageing related events occurred at Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(86), 44 –51. doi: 10.32918/nrs.2020.2(86).06.

5. ТУ 108-11-492-80. Details of the main seal 1117.02.13.000. Technical specifications.

6. Working program for technical condition assessment and lifetime extension for the main sealing parts of ZNPP-1, 2, 3, 4. 1234.РО.УС.ПМ.275-17/Н.

7. НП 306.2.141-2008. General safety provision for nuclear power plants approved by SNRIU Order No.162 of 19 November 2007 and registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 25 January 2008 under No. 56/14747.

8. НП 306.2.099–2004. General requirements for NPP lifetime extension upon results of periodic safety review approved by SNRIU Order No.181 of 26 November 2004 and registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 15 December 2004 under No. 1587/10186.

9. PNAE G-7-002-86. (1989). Standards for strength calculation of NPP equipment and piping.

10. PNAE G-7–008–89. Rules for design and safe operation of components and piping of nuclear power plants.

11. ПМ-Д 0.08.222–06. Standard program for ageing management of NPP unit components.

12. NP 306.2.208-2016. Requirements for seismic resistance design and for evaluation of seismic safety of Ukrainian NPPs approved by SNRIU Order No. 175 of 17 October 2016 and registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 7 November 2016 under No. 1449/29579.

13. STP 0.41.076-2008. Safety analysis and assessment. The procedure for using design codes to justify safety of nuclear power plants. Methodical instructions approved by Energoatom Order No. 1181-r of 2 December 2008.

14. PM-T.0.03.061-13. Standard program for periodic monitoring of the condition of the base metal, welded joints and surfacing of equipment and pipelines for WWER-1000 nuclear power plants (ТППК-13).

15. GOST 4543-71. Alloy structural steel rolled products. Technical specifications.

16. DSTU GOST 23304: 2012 (GOST 23304-78, IDT). Bolts, studs, nuts and washers for flange connections of NPP. Technical specifications. Acceptance. Test methods. Marking, packaging, transportation and storage.

17. GOST 1497-84 (ISO 6892-84). Metals. Tensile test methods.

18. GOST 9651-84 (ISO 783-89). Metals. Tensile test methods at elevated temperatures.

19. GOST 9454-78. Metals. Impact test method at low, room and high temperatures.

20. SOU-N NAEK 133:2016. Engineering, scientific and technical support. Methodology for defining mechanical properties of metal upon strength test results approved by Energoatom Order No. 523 of 21 June 2017.

21. Calculated justifications of the lifetime extension for the main sealing parts of ZNPP-1, 2, 3, 4 taking into account the actual mechanical properties of the material and its aging.

22. Report on the implementation of the state review on nuclear and radiation safety of the document «Report. Technical condition assessment of the main sealing parts of power units №№ 1, 2, 3, 4 SE ZNPP based on the test results of the samples» (Report № 18-09-10812).

cessfully used in the last two decades. On the way of carrying out works to extend the lifetime of NPP SSCs and the transition to long-term operation, Ukraine has accumulated the unique experience and practice for various WWER type reactor.

The article analyzes the operating conditions of the main sealing parts (MSPs) of the reactor, leading to changes in the mechanical properties of the base metal of the stud in the course of time and considers its distribution along the length and cross section, which is uneven. This distribution of mechanical properties requires consideration when assessing the strength of the reactor main seal and the stud. As part of this work, the experience of performing work on the technical condition assessment (TCA) of MSPs for Zaporizhzhya NPP 1-4 under transition to long-term operation from the point of view of the carried out NRS state reviews for the corresponding substantiations of lifetime extension for MSPs. It was confirmed that one of the defining parameters of the technical condition affecting the validity of making a decision on the possibility of extending the service life and the formation of initial data when justifying the strength of MSPs are the mechanical properties of the base metal, which change during the operation of MSPs.

Based on the obtained results of the TSE analysis, a conclusion was made regarding the probable reasons that lead to a change in the mechanical properties of the MSPs base metal. The need to take into account changes in metal properties when calculating strengths was analyzed, taking into account the predicted values of the mechanical properties of the metal during the lifetime extension and impacts of these factors on the formation of aging management measures.

Keywords: main sealing parts, long-term operation, aging management measures, mechanical properties, technical condition assessment, calculated strength justifications.

### Summary of Current Technical Condition Assessment Results and Life Extension for the Main Sealing Parts of WWER-1000 of ZNPP Units No. 1-4

Отримано 22.01.2021

**Cherniak Ya.<sup>1</sup>, Shugailo O-i<sup>1</sup>, Brik D.<sup>1</sup>,  
Kuznetsova K.<sup>1</sup>, Demeshko V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Separated entity «Zaporizhzhya NPP» of the National Nuclear Energy Generating Company «Energoatom», Energodar, Ukraine

The lifetime extension of NPP structures, systems and components (SSCs) is an established practice all over the world nowadays, which has been suc-