

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО**

### ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ КОРПУСІВ ПАРОВИХ ТУРБІН АЕС

**АНОТАЦІЯ** Обґрунтовано продовження терміну експлуатації енергетичного обладнання шляхом розрахункових досліджень теплового, напружено-деформованого стану та оцінки залишкового ресурсу корпусу циліндра високого тиску парової турбіни K-1000-60/3000 блоку 1000 МВт «Рівненська АЕС» державне підприємство НАЕК «Енергоатом». Розрахунковий ресурс металу корпусу циліндра високого тиску турбоагрегату K-1000-60/3000 ст. № 3 Рівненської АЕС вироблений на 10 %. Запаси короточасної статичної міцності корпусу циліндра високого тиску ніде не виходять за межі допустимих. Індивідуальний залишковий ресурс корпусу циліндра високого тиску парової турбіни K-1000-60/3000 становить 272676 годин, що дозволяє продовжити експлуатацію корпусу циліндра високого тиску на 10 років по умовах роботи реактору.

**Ключові слова:** тепловий стан, напружено-деформований стан, залишковий ресурс, статична міцність, малоциклова втома, циліндр високого тиску, понад проектний період, пуск з холодного стану, пуск з гарячого стану.

**О. CHERNOUSENKO**

### EVALUATION OF THE RESIDUAL LIFE OF THE CASINGS OF STEAM TURBINES USED BY NUCLEAR POWER PLANTS (NPP)

**ABSTRACT** The experience of the operation of nuclear power plants allows us to substantiate the revision of earlier specified lifetime for the power units of nuclear power plants. In December 2016 the specified lifetime expires for the power unit No3 at the Rivne NPP equipped with the reactor of a BBEP-1000 type and the turbine K-1000-60/3000 and the residual life of the equipment must be evaluated to provide a reliable operation for new power units and the reduction of the expenditures for putting them into the operation. The purpose of this scientific paper is to extend the operation life for the power equipment. For structurally complicated HPC casings three-dimensional structures with horizontal flanges, steam supply pipe branches and other elements are taken into account. The methods were developed to create dimensional analogues of the elements of turbine machines using Solidworks software product for the HPC casing. The geometric model was constructed on the basis of the certificate drawing for the K-1000-60/3000 turbine. A maximum intensity value of conventional elastic stresses caused by a difference in the temperature and steam pressure in HPC is observed in the steam inlet zone near the flanges and it is equal to  $\sigma_{\max} = 526$  MPa in the case of cold start. A reduced deformation of casing is 0,0018 % in the case of cold start (CS) at a time point of 1800 s and it is equal to 0,00276 % in the case of hot start (HS) at a time point of 360 s, which corresponds to allowable norms of 0,09 %. A maximum temperature gradient in the case of hot start arises in the HPC for all control units at a time point of 360 s. Extension of the operation life of power equipment was substantiated by carrying out computing investigations of the thermal state and the mode of deformation and the evaluation of the residual life of the HPC casing of the steam turbine K-1000-60/3000 for the power unit of 1000 MW "Rivne NPP" owned by the state company "Energoatom". The estimated life of the casing metal for the high pressure cylinder of steam turbine K-1000-60/3000 is worked out by 10 %. The margins of statistical strength of the HPC casing are everywhere within allowable limits. The individual residual life of the casing of high pressure cylinder of the steam turbine K-1000-60/3000 is 272676 hours that allows us to extend the term of operation for 10 years taking into consideration reactor operation conditions.

**Key words:** thermal state, mode of deformation, residual life, statistical strength, low-cycle fatigue, high pressure cylinder, extra-design period, cold start, and the hot start.

#### Вступ

Ядерна енергетика є важливою складовою паливно-енергетичного комплексу України і займає провідне місце в забезпеченні енергетичних потреб країни. АЕС виробляють половину спожитої в Україні електроенергії. В умовах обмежених фінансових ресурсів, значного вичерпання ресурсу обладнання теплових електростанцій і дефіциту органічного палива стійкість та надійність роботи ядерної енергетики позитивно впливають на стабілізацію соціально-економічного розвитку України.

В даний час в Україні реалізується програма продовження термінів експлуатації енергетичного обладнання АЕС [1]. З п'ятнадцяти діючих в Україні енергоблоків термін експлуатації трьох вже було продовжено для їх роботи у понад проектний

період. Це енергоблоки № 1 і 2 Рівненської АЕС, строк служби яких продовжили на 20 років, та енергоблок № 1 Южно-Української АЕС, який працюватиме протягом додаткових 10 років. Досвід проведених робіт показав, що питомі фінансові витрати на виконання вимог нормативних документів, які забезпечують можливість отримання ліцензії на експлуатацію енергоблоків в період додаткового строку служби, значно менше витрат на будівництво нових енергоблоків.

До 2020 року спливає термін проектної експлуатації ще 9 атомних енергоблоків України. Схожа ситуація склалася й у світовій атомній енергетиці, де протягом 2010–2020 р.р. приблизно 80 % енергоблоків АЕС, вичерпають проектний ресурс. Як свідчить світовий досвід, продовження термінів експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектного терміну експлуатації є поте-

нційно можливим, і за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки – одним з найбільш ефективних шляхів для часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей.

Досвід експлуатації атомних станцій дозволяє обґрунтувати перегляд раніше встановлених термінів служби устаткування і енергоблоків АЕС. В зв'язку з тим, що в грудні 2016 року спливає назначений термін експлуатації енергоблоку № 3 Рівненської АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 (В-320) і турбіною К-1000-60/3000. Виникає потреба оцінки залишкового ресурсу енергетичного обладнання такого типу для забезпечення надійного енергоспоживання і зниження витрат на введення нових енергоблоків.

### Мета й завдання дослідження

Метою даної роботи є обґрунтування продовження терміну експлуатації енергетичного обладнання шляхом вирішення наступних завдань: розрахункових досліджень теплового, напружено-деформованого стану та оцінка залишкового ресурсу корпусу ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 блоку 1000 МВт станційний номер № 3 відокремленого підприємства «Рівненська АЕС» державного підприємства НАЕК «Енергоатом» згідно нормативних документів [2–3].

### Опис об'єкту дослідження та особливості чисельної моделі

Турбіна К-1000-60/3000 – парова, конденсаційна, з нерегульованими відборами пари, з проміжною сепарацією і одноступінчастим паровим проміжним перегрівом, розрахована для роботи в блоці з реактором ВВЕР 1000. Циліндр високого тиску розташований в середній частині турбіни, а циліндри низького тиску – симетрично по обидві сторони ЦВТ (по два ЦНТ з кожної сторони). Циліндр високого тиску (ЦВТ) має два потоки по п'ять ступенів тиску, складається із зовнішнього і внутрішнього корпусів. У внутрішньому корпусі встановлені діафрагми перших двох ступенів кожного потоку; діафрагми інших ступенів кріпляться в обоймах, розташованих в розточеннях зовнішнього корпусу. Підведення пари в ЦВТ виконано боковим, по двох патрубках Ду-800, які розташовані в нижній половині корпусу (по одному з кожного боку турбіни).

У даній роботі при оцінці залишкового ресурсу елементів парових турбін виконується розрахункова оцінка теплового (ТС), напружено-деформованого стану (НДС), малоциклової втоми

(МЦВ), пошкоджуваності і залишкового ресурсу корпусу ЦВТ з урахуванням фактичних даних про режими експлуатації парової турбіни великої потужності і властивостей металу її основних елементів згідно нормативних документів [4, 5]. Крім того, для конструктивно складних корпусів ЦВТ враховуються тривимірні конструкції з фланцями горизонтального роз'єму, патрубків підведення пари та інших складних елементів.

На першому етапі перевірконого розрахунку розроблена методика створення просторових аналогів елементів турбомашин з застосуванням програмного продукту *Solidworks* для корпусу ЦВТ (рис. 1). Побудова геометричної моделі виконувалась на основі паспортного креслення турбіни К-1000-60/3000. Спочатку побудовано ескіз (профіль обертавання) для корпусу з вихідних даних. Габаритна довжина корпусу циліндру складає 5400 мм, зовнішній радіус – 1450 мм.

### Результати досліджень та обговорення

Результати досліджень та обговорення (рис. 2–6). На другому етапі перевірконого розрахунку розроблений спосіб вирішення за допомогою програмних комплексів *ANSYS* і *COSMOSWorks* крайової задачі нестационарної теплопровідності із завданням граничних умов (ГУ) теплообміну на поверхнях корпусу ЦВТ на базі створених геометричних 3-D моделей. ГУ відповідали експлуатаційним режимам по типу пусків з холодного стану і гарячого станів, стаціонарного режиму [6]. При визначенні ГУ згідно до рекомендацій [7] враховувалися схеми витоків пари в ущільненнях, реальні графіки пуску з різних теплових станів (холодного і гарячого), попадання конденсату в проточну частину парової турбіни. Задавалась відсутність або наявність ізоляції по всій довжині фланців. Третій етап перевірконого розрахунку містить визначення з використанням програмних комплексів *ANSYS* і *COSMOSWorks* НДС корпусу ЦВТ з урахуванням просторової складної геометрії. Напружено-деформований стан визначався для наступних видів напруг: напруги від тиску та температурних напружень. Розрахунки проводилися з використанням програмного комплексу *SolidWorks Simulation*. Матеріал корпусів – легувана сталь 15X1M1ФЛ.

Теплофізичні та фізико-механічні характеристики сталі 15X1M1ФЛ задавалися в залежності від температури відповідно до рекомендацій [4]. ТС і НДС корпусу ЦВТ турбіни К-1000-60/3000 розраховувалося для пуску з гарячого стану (ГС) та пуску з холодного стану (ХС).

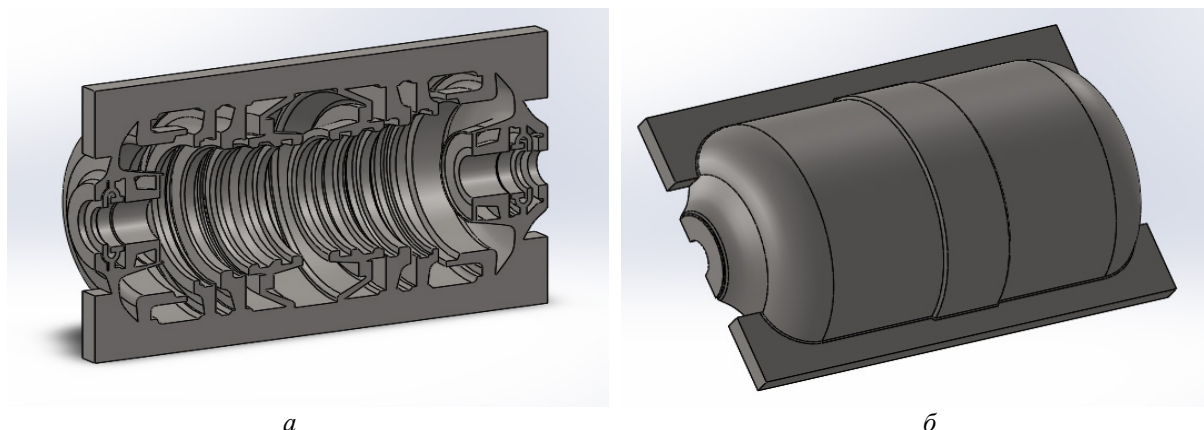


Рис. 1 – 3-D просторовий аналог корпусу циліндру високого тиску парової турбіни:  
а – вид знизу; б – вид зверху

### Розрахункова оцінка теплового та напружено-деформованого стану корпусу ЦВТ

При пусках з холодного стану ХС максимальний градієнт температур виникає в ЦВТ по всіх контрольним вузлах при початковому наборі оборотів у момент часу 1800 с (рис. 2).

Максимальна величина інтенсивності умовних пружних напружень від спільного впливу різниці температури і тиску пари в ЦВТ відмічена в частині впуску пари біля фланців (рис. 3б). Величина їх складає  $\sigma_{\max} = 526$  МПа при пусках з ХС.

Приведена деформація корпусу від впливу температурних напружень та тиску пари (рис. 4) складає 0,0018 % при пуску з ХС в момент часу 1800 с та 0,00276 % при пуску з ГС в момент часу 360 с, що відповідає допустимим нормам в 0,09 %. Максимальний градієнт температур при пусках з гарячого стану (ГС) виникає в ЦВТ по всіх контрольним вузлах в момент часу 360 с. На рис. 5 наведено графіки зміни градієнтів температур при пуску з ГС і характерні точки максимальних градієнтів температур для ЦВТ.

Як видно з епюри напружень (рис. 6б), в частині корпусу, де здійснюється впуск пари поблизу фланців, відмічена максимальна величина інтенсивності умовних пружних напружень від спільного впливу різниці температури і тиску пари в

ЦВТ. Величина їх складає  $\sigma_{\max} = 716,7$  МПа при пусках з ГС.

### Розрахункова оцінка малоциклової втоми та залишкового ресурсу корпусу ЦВТ

На четвертому етапі зроблено розрахункову оцінку малоциклової втоми з використанням комплексу програм НТУУ «КПІ» і програмних комплексів *ANSYS* і *COSMOSWorks* на базі розрахункової зміни НДС корпусу ЦВТ.

Розрахунки виконувалися відповідно до рекомендацій нормативних документів [4]. Використовувалися експериментальні залежності втоми сталі при ізотермічному симетричному циклі навантаження. Результати розрахункової оцінки малоциклової втоми міцності металу ЦВТ представлені в табл. 1.

З урахуванням даних по ТС, НДС, оцінки малоциклової втоми металу ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 (табл. 1) розрахункова оцінка пошкоджуваності, залишкового допустимого напруження в роках та індивідуального ресурсу корпусу ЦВТ для енергоблоку ст. № 3 Рівненської АЕС представлена в табл. 2. Оцінка короточасної статичної міцності корпусів ЦВТ виконується згідно з рекомендаціями [5].

Таблиця 1 – Розрахункова оцінка малоциклової втоми металу корпусу ЦВТ турбіни

ЦВТ	Температура по товщині стінки корпусу, $t_{\max}$ , °С	Інтенсивність напружень, $\sigma_i$ , МПа	Приведена деформація, $\epsilon_{a пр}$ , %	Допустиме число пусків, $N_d$
				$n_{ц} = 5 \quad n_{г} = 1,5$
ХС	155	520,0	0,1543	6000
ГС	180	700,0	0,2023	2000

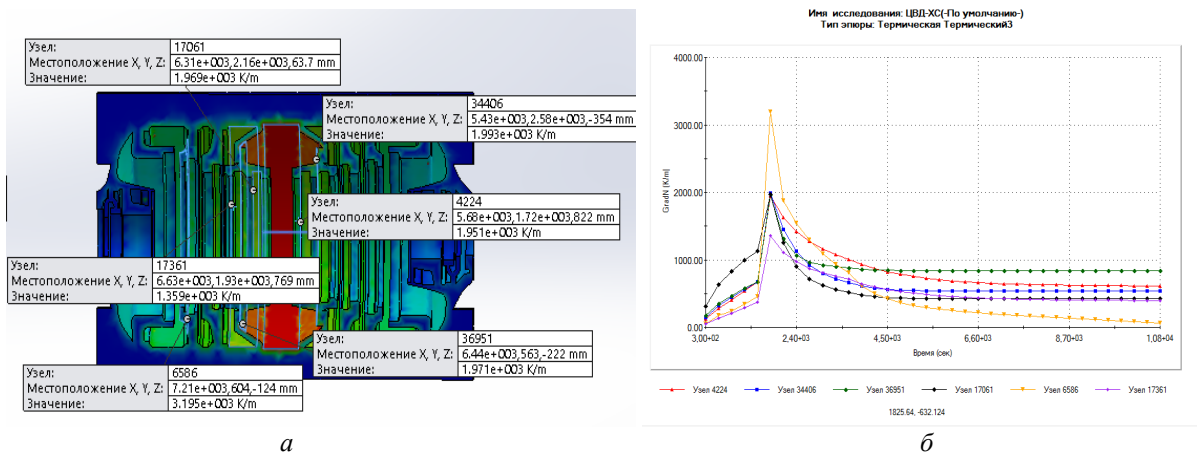


Рис. 2 – Максимальні градієнти температур (а) для ЦВТ та графіки зміни градієнтів температур при пуску з ХС (б):  
а – максимальні градієнти температур; б – зміна градієнтів температур для ЦВТ

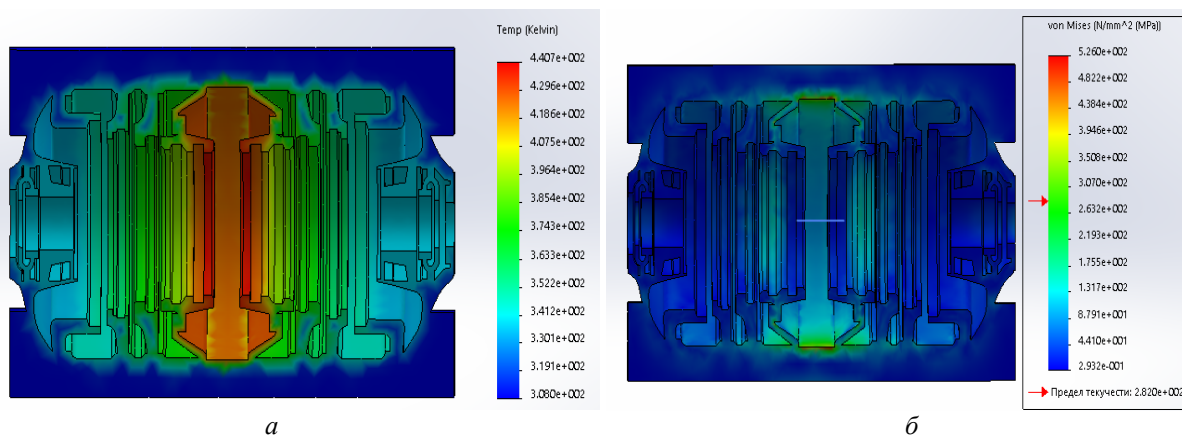


Рис. 3 – ТС для ЦВТ (а); НДС для ЦВТ (б) при пуску з ХС в момент часу 1800 с:  
а – тепловий стан ЦВТ; б – напружено-деформований стан ЦВТ

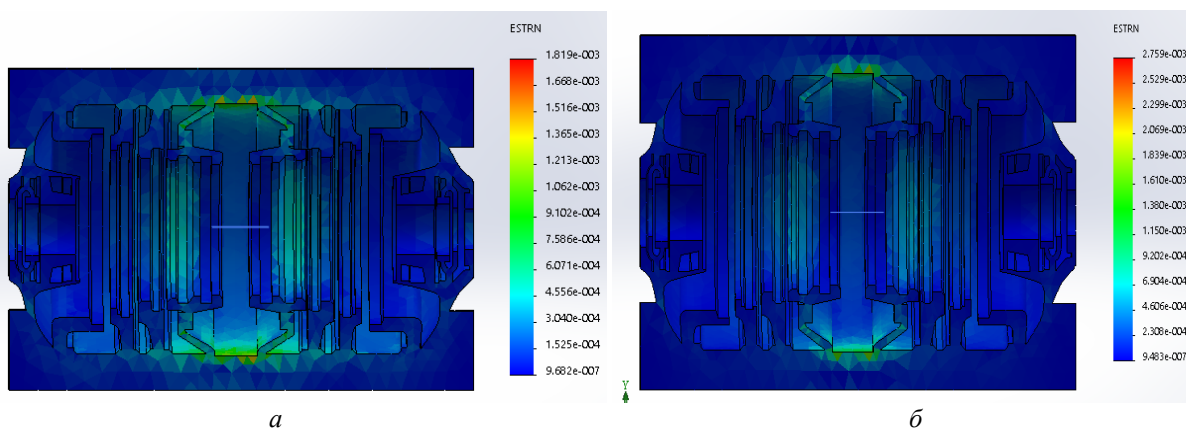


Рис. 4 – Деформація ЦВТ при пуску з ХС в момент часу 1800 с (а) та ГС 360 с (б):  
а – пуск з ХС в момент часу 1800 с; б – пуск з ГС в момент часу 360 с

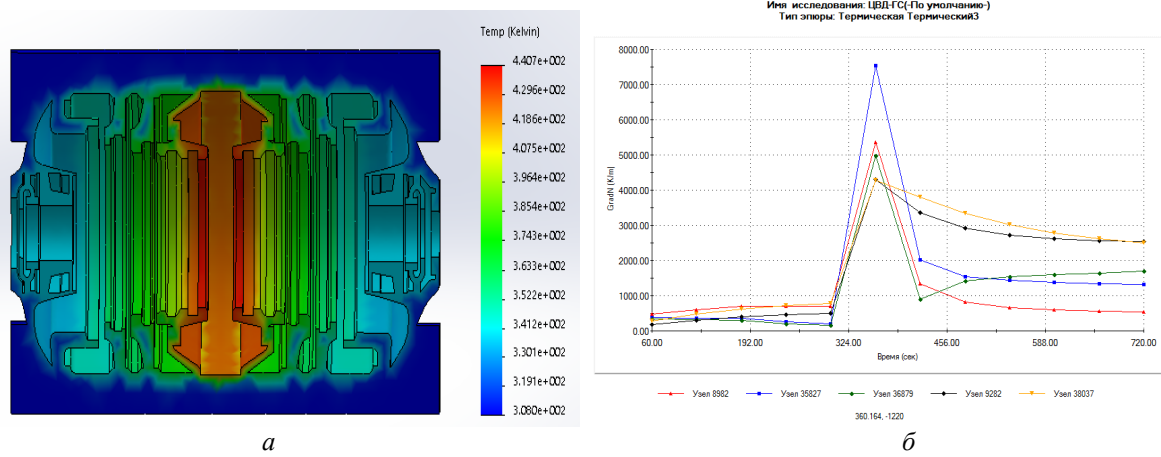


Рис. 5 – Максимальні градієнти температур (а) для ЦВТ та графіки зміни градієнтів температур при пуску з ГС (б):  
а – максимальні градієнти температур; б – зміни градієнтів температур

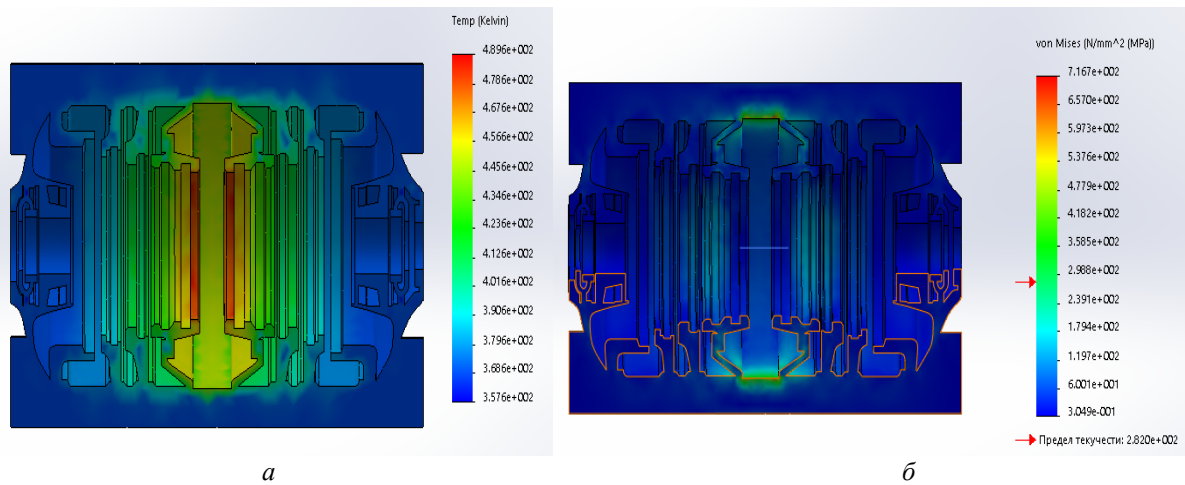


Рис. 6 – ТС для ЦВТ (а); НДС для ЦВТ (б) при пуску з ГС в момент часу 360 с:  
а – тепловий стан ЦВТ; б – напружено-деформований стан ЦВТ

Таблиця 2 – Розрахункова оцінка пошкодження та індивідуального ресурсу корпусу ЦВТ турбіни

№ п/п	Назва	Формула	ЦВТ
1	Температура металу, °С	$t$	180
2	Інтенсивність напружень, МПа	$\sigma_{\text{імах}}$	88
3	Границя текучості, МПа	$\sigma_{02}^B$	282
4	Номінальне еквівалентне напруження, МПа	$2\tau_{\text{мах}} = \sigma_3$	90,0
5	Запас міцності $\sigma_{\text{імах}}$	$n_t' = \sigma_{02}^B / \sigma_{\text{імах}}$	3,2045
6	Запас міцності по $\sigma_3$	$n_t'' = \sigma_{02}^B / 2\tau_{\text{мах}}$	3,1333
7	Допустиме число циклів по різним типам пусків	$[N_{pl}] n_{\text{ХС}}^{\text{ЦВТ}} = 51$	6000
		$[N_{pl}] n_{\text{ГС}}^{\text{ЦВТ}} = 190$	2000
8	Циклічна пошкоджуваність	$[\Pi_{\text{ц}}] = \sum n_i / [N_{pl}]$	0,1035
9	Допустимий час роботи металу	$[t_{pl}]$	$3,7 \times 105$
10	Число годин роботи на рік	$\tau_{\text{год}} = T/z$	6100,0
11	Річна циклічна пошкоджуваність	$[\Pi_{\text{Г}}'] = \sum n_{\text{Г}} / [N_{pl}]$	0,003569
12	Річна статична пошкоджуваність	$[\Pi_{\text{ст}}''] = \sum \tau_{\text{год}} / [t_{pl}]$	0,016486
13	Сумарна пошкоджуваність за рік	$[\Pi_{\text{Г}}''] = [\Pi_{\text{ст}}''] + [\Pi_{\text{ц}}'']$	0,020055
14	Залишкове напрацювання, рік	$G = 1 - [\Pi_{\text{Г}}'] / [\Pi_{\text{Г}}'']$	44,7
15	Залишковий ресурс, год	$T_{\text{ост}} = G\tau_{\text{год}}$	272676

Таким чином, розрахунковий ресурс металу корпусу ЦВТ турбоагрегату К-1000-60/3000 блоку № 3 Рівненської АЕС вироблений на 10 %. Запаси короточасної статичної міцності корпусу ЦВТ ніде не виходять за межі допустимих ( $n'_T \geq 1,5$ ), що дозволяє подальшу експлуатацію. Згідно розрахунків, індивідуальний залишковий ресурс корпусу ЦВТ парової турбіни К-1000-60/3000 становить 272676 годин, що дозволяє продовжити експлуатацію корпусу ЦВТ на 10 років по умовах роботи реактору.

### Висновки

1 Для парової турбіни К-1000-60/3000 вдосконалено математичну модель теплового (ТС), напружено-деформованого стану (НДС), малоциклової та статичної втоми корпусу ЦВТ парової турбіни на базі 3D-просторових аналогів.

2 За допомогою математичного та фізичного моделювання отримано розрахункові дані по ТС, НДС та залишковому ресурсу енергетичного обладнання парової турбіни К-1000-60/3000 Рівненської АЕС з урахуванням реальних умов експлуатації.

3 Обґрунтовано рекомендації щодо продовження терміну експлуатації парової турбіни К-1000-60/3000 блоку № 3 Рівненської АЕС.

### Список літератури

- 1 Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2004 № 263-р «Про схвалення комплексної програми робіт з продовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій». – Режим доступу: [www.kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua). – Загравіє с екрана. – 10.01.2016.
- 2 **Навроцкий, Б. Л.** Выполнение комплекса мероприятий по оценке технического состояния и переназначения срока эксплуатации турбин 1000 МВт энергоблоков АЭС [Текст] / **Б. Л. Навроцкий, М. А. Мороз, П. В. Скип** // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2012. – С. 52–59. – ISSN 2076-1570.
- 3 Комплексная программа модернизации и повышения безопасности энергоблоков атомных электростанций / Распоряжение КМ Украины от 29.08.2002 г. – № 504-р. – Режим доступу: [www.kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua). – Загравіє с екрана. – 10.01.2016.
- 4 РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость [Текст]. – М., 1985. – № АЗ–002/7382. – 49 с.
- 5 РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса [Текст]. – М., 1996. – 98 с.

- 6 Турбина паровая К-1000/60-3000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации № 1-Э-ТЦ-2 [Текст]. – Кузнецовск : НАЭК «ЭНЕРГОАТОМ», 2006. – 112 с.
- 7 РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования [Текст]. – М., 1973. – № ВК-002/3209. – 104 с.

### Bibliography (transliterated)

- 1 Rasporjadgenja Cabinety Ministriv Ukrainy vid 29 kvitnja 2004 № 263-p. "Pro sxvalenla kompleksnoy programy robot z prodovgenja terminu jekspluatatsii diuchux energoblokov atomnix elektrostancij" [Order of the cabinet of the ministry of Ukraine 29 April 2004 № 263-p. "About statement of the complex program of the works extension of service life of the power units of the nuclear power plants"], available at: [www.kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua) (Accessed 10 January 2016).
- 2 Nawrocki, B. L., Frost, M. A., Skip, P. V. (2012), "Vpohnenie kompleksa meroprijatij po ocenka texnicheskogo sostojanij i perenaznachenie sroka ekspluatatsiyi turbin 1000 MVt energoblokov AES [A range of measures to assess the technical condition and reassignment of service life of the turbines of 1,000 MW nuclear power plants]", *Zbirnik naukovix praz SHUYEiP [Collection of scientific papers SNUYaEtaP]*, pp. 52–59, ISSN 2076-1570.
- 3 Kompleksnaja programa modernizatsii i povushenija bezopasnosti energoblokov atomnix elektrostancij / Rasporjadgenie KM Ukrainy ot 29.08.2002 g. – № 504-p. [A comprehensive program of modernization and improve safety NPPs / Ordinance Cabinet of Ukraine from 29.08.2002, the – № 504-p], available at: [www.kmu.gov.ua](http://www.kmu.gov.ua) (Accessed 10 January 2016).
- 4 (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovyh stacionarnyh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost' [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation]*, Moscow, Russian.
- 5 (1996), RD 34.17.440–96. *Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedenija robot pri ocenke individual'nogo resursa parovyh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatatsii sverh parkovogo resursa [Guidelines on how to conduct work in the evaluation of individual resource steam turbines and extend their useful life in excess of park resources]*, Moscow, Russian.
- 6 (2006), Turbina parovaja K-1000/60-3000. *Texnicheskoe opisaniye i instrukcija po jekspluatatsii №1-E-TC-2 [The steam turbine K-1000 / 60-3000. Technical description and user manual №1-E-TC-2]*, NAEC "Energoatom", Kuznetsovsk, Ukraine.
- 7 (1973), RTM 24.020.16-73. *Turbiny parovye stacionarnye. Raschet temperaturnyh polej rotorov i cilindrov parovyh turbin metodom jelektromodelirovanija [Stationary steam turbines. The calculation of the temperature fields of the rotors and the cylinders of steam turbines by electrical analogy method]*, Moscow, Russian.

### Відомості про авторів (About authors)

**Черноусенко Ольга Юрійвна** – доктор технічних наук, професор, Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут», завідувач кафедри Теплоенергетичних установок теплових і атомних

електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 504-82-92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; cher\_olya@2c.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1427-8068.

**Chernousenko Olga Yuriivna** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Head of the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants; Kyiv; tel.: (067) 504-82-92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; cher\_olya@2c.kiev.ua.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Черноусенко, О. Ю.** Оцінка залишкового ресурсу корпусів парових турбін АЕС [Текст] / **О. Ю. Черноусенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 129–135. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.18.

Please cite this article as:

**Chernousenko, O.** (2016), "Evaluation of the Residual Life of the Casings of Steam Turbines Used by Nuclear Power Plants (NPP)". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 129–135, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.18.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Черноусенко, О. Ю.** Оценка остаточного ресурса корпусов паровых турбин АЭС [Текст] / **О. Ю. Черноусенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 129–135. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.18.

**АННОТАЦИЯ** Обосновано продление срока эксплуатации энергетического оборудования путём расчётных исследований теплового, напряжённо-деформированного состояния и оценки остаточного ресурса корпуса цилиндра высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000 блока 1000 МВт «Ровенская АЭС» Государственного предприятия НАЭК «Энергоатом». Расчётный ресурс металла корпуса цилиндра высокого давления турбоагрегата К-1000-60/3000 выработан на 10 %. Запасы статической прочности корпуса ЦВТ нигде не выходят за границы допустимых. Индивидуальный остаточный ресурс корпуса цилиндра высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000 составляет 272676 часов, что позволяет продлить эксплуатацию на 10 лет по условиям работы реактора.

**Ключевые слова:** Тепловое состояние, напряжённо-деформированное состояние, остаточный ресурс, статическая прочность, малоцикловая усталость, цилиндр высокого давления, сверхпроектный период, пуск из холодного состояния, пуск из горячего состояния.

Надійшла (received) 26.01.2016