

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Д. В. РИНДЮК, В. А. ПЕШКО

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ РОТОРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130 ЕНЕРГОБЛОКА № 11 ДТЕК БУРШТИНСЬКА ТЕС

Бурштинська ТЕС відокремлена від об'єднаної енергосистеми України, працює у складі «Бурштинського острова» паралельно з об'єднаною енергетичною системою європейських країн (UCTE). Робота в межах «Бурштинського острова» вимагає завантаження до дев'яти енергоблоків станції, тоді як перед тим на станції працювали не більше шести енергоблоків. З одного боку, приєднання до UCTE відкрило можливості для збільшення експортних поставок електроенергії з України. З другого боку, режим роботи електростанції в «Бурштинському острові» вкрай негативно впливає на стан обладнання, оскільки вимагає маневрової роботи станції – частих пусків-зупинок блоків. Внаслідок такого режиму значно зросла аварійність ТЕС. Тому, актуальним є визначення індивідуального ресурсу енергоблоків Бурштинської ТЕС та оцінка можливості продовження експлуатації. За розрахунковими оцінками сумарна пошкодженість металу ротора середнього тиску турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС дорівнює 107 %, при коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 5 і 1,5, а також при допустимому часі роботи металу 370 тис. год. Якщо сумарна пошкодженість металу ротора більше 100 %, то подальша експлуатація обладнання неможлива згідно нормативних документів і ресурс вважається вичерпаним. При коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 3 і 1,25, а також допустимому часі роботи металу 450 тис. год., згідно експериментальних даних, сумарна пошкодженість металу ротора ЦСТ знаходиться на рівні 83 %. Залишковий ресурс металу ротора ЦСТ турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС складе 58908 год. Таким чином, за позитивного рішення експертної комісії у прийнятті знижених коефіцієнтів запасу міцності, допустимий термін експлуатації ротора ЦСТ турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС може бути продовжений на 50 тис. год. з додатковим числом пусків не більше 400.

Ключові слова: об'єднана енергетична система європейських країн (UCTE), теплова електростанція (ТЕС), парова турбіна, ротор, індивідуальний ресурс, пошкодженість металу, залишковий ресурс.

O. CHERNOUSENKO, D. RINDYUK, V. PESHKO INVESTIGATION OF THE RESOURCE INDICATORS OF THE INTERMEDIATE PRESSURE ROTOR OF THE K-200-130 TURBINE OF POWER UNIT NO. 11 OF DTEK BURSHTYN TPP

The Burshtyn TPP is separated from the unified energy system of Ukraine, operates as part of the "Burshtynskii Ostriv" in parallel with the Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE). Work within the "Burshtynskii Ostriv" requires the loading of up to nine power units of the station, whereas before that, no more than six power units worked at the station. On the one hand, joining the UCTE opened opportunities for increasing export supplies of electricity from Ukraine. On the other hand, the maneuvering mode of operation of the power plant in "Burshtynskii Ostriv" has an extremely negative effect on the condition of the equipment, as it leads to frequent start-stops of units. As a result of this regime, the accident rate of TPPs has increased significantly. Therefore, it is important to determine the individual resource of Burshtyn TPP power units and assess the possibility of continuing the operation. According to calculations, the total damage of the metal of the intermediate pressure rotor of the K-200-130 turbine unit of power unit No. 11 of DTEK Burshtyn TPP is 107%, with the coefficients of the safety margin for the number of cycles and for deformations at the level of 5 and 1.5, as well as at the permissible metal working time 370 thousand hours. If the total damage of the rotor metal is more than 100%, then further operation of the equipment is impossible according to regulatory documents and the resource is considered to be exhausted. According to experimental data, with the coefficients of safety margin for the number of cycles and deformations at the level of 3 and 1.25, as well as the allowable working time of the metal of 450 thousand hours, the total damage of the metal of the rotor is 83%. The residual resource of the intermediate pressure rotor of the K-200-130 turbine of power unit No. 11 of DTEK Burshtyn TPP will be 58 908 hours. Thus, with the positive decision of the expert commission in accepting the reduced coefficients of safety margin, the allowable service life of the intermediate pressure rotor of the K-200-130 turbine of power unit No. 11 of DTEK Burshtyn TPP can be extended by 50,000 hours. with additional number of starts of no more than 400.

Key words: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity (UCTE), thermal power plant (E33), steam turbine, rotor, individual service life-time, metal damage, residual resource.

Вступ

Теплові електричні станції відіграють важливу роль у генерації електричної енергії в Об'єднаній енергетичній системі України, бо забезпечують маневрування разом з ГЕС та ГАЕС. Відомо, що з 1 липня 2002 року Бурштинська ТЕС відокремлена від об'єднаної енергосистеми України, працює у складі «Бурштинського острова» паралельно з об'єднаною енергетичною системою європейських країн (UCTE). Робота в межах «Бурштинського острова» вимагає завантаження до дев'яти енергоблоків станції, тоді як перед тим на станції працювали не більше шести енергоблоків. З одного боку, приєднання до UCTE відкрило можливості для збільшення експортних поставок

електроенергії з України. З другого боку, режим роботи електростанції в «Бурштинському острові» вкрай негативно впливає на стан обладнання, оскільки вимагає маневрової роботи станції – частих пусків-зупинок блоків. Внаслідок такого режиму значно зросла аварійність ТЕС. Тому, актуальним є визначення індивідуального ресурсу енергоблоків Бурштинської ТЕС та оцінка можливості продовження експлуатації.

Мета роботи

Метою роботи є розрахункове обґрунтування можливості продовження строку експлуатації ротора середнього тиску турбіни К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС. Для цього

© О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк, В. А. Пешко, 2022

проведено дослідження опірності основного металу ротора накопиченню малоциклової втоми та статичного пошкодження для типових режимів роботи, а також розраховано ресурсні показники експлуатації.

Аналіз стану питання

Можливість роботи енергоблока ТЕС у маневреному режимі визначається надійністю експлуатації роторів парових турбін, одного з аварійно небезпечних елементів ТЕС. Зниження навантаження енергоблока із зупинкою на ніч на 4–6 год. та подальшим пуском з гарячого стану підвищує темпи зношення роторів енергоблоків, виходячи з особливостей їх прогріву на маневрених режимах експлуатації [1].

Для оцінки індивідуального ресурсу ротора енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС необхідно врахувати, що його напрацювання становить 297 143 год. при сумарному числі пусків з різних теплових станів 1329 станом на 01.08.2021 р. При цьому парковий ресурс турбіни К-200-130 складає 220 тис. год. при парковому числі пусків 800 згідно нормативного документу [2].

Досвід експлуатації енергетичного обладнання різних країн світу дозволяє продовжити експлуатацію турбінного обладнання понад парковий ресурс. У нормативних документах України [2–4] визначено порядок та можливість продовження експлуатації енергетичного обладнання шляхом оцінки залишкового ресурсу.

Математична модель розрахунку залишкового ресурсу ротора середнього тиску турбіни К-200-130

Розрахунок накопиченої малоциклової втоми в роторі середнього тиску виконано у відповідності до нормативних документів [2, 3]. Для визначення амплітуди інтенсивності деформації в кожній з досліджуваних областей РСТ (рис. 2) використано метод Найбера для приведення асиметричного циклу навантаження металу до симетричного виду.

Амплітуда інтенсивності деформації визначалась за значеннями інтенсивності деформації протягом циклу навантаження:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2}(\varepsilon_{i\max} - \varepsilon_{i\min}), \quad (1)$$

де $\varepsilon_{i\max}$, $\varepsilon_{i\min}$ – максимальне і мінімальне значення інтенсивності деформації в циклі навантаження.

Число циклів навантаження до появи тріщини визначалось за експериментальними кривими малоциклової втоми, що отримані за результатами випробувань зразків на розтяг-стиснення при жорсткому симетричному циклі і постійній температурі, меншим з двох значень:

$$N_d = \min \left\{ \frac{N_1}{n_N}; N_2 \right\}, \quad (2)$$

де N_1, N_2 – число циклів навантаження, що відповідають на кривих малоциклової втоми амплітудам інтенсивності деформації $\varepsilon_{a,пр.}$ та $n_\varepsilon \cdot \varepsilon_{a,пр.}$ відповідно;

n_N, n_ε – коефіцієнт запасу міцності по числу циклів і деформації;

$\varepsilon_{a,пр.}$ – приведена до симетричного циклу навантаження амплітуда інтенсивності деформації з врахуванням ефективного коефіцієнту інтенсивності напружень $\overline{K_T}$.

Приведена до симетричного циклу навантаження амплітуда інтенсивності деформації розраховується за допомогою рівняння:

$$\varepsilon_{a,пр.} = \frac{1+\nu}{1,5E} (C\sigma_a + \sigma_{-1} - \sigma_N), \quad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності сталі 25Х1М1ФА;

C – коефіцієнт поточного числа циклів,

$$C = \begin{cases} 1, & \text{при } N \leq 10^4 \\ \frac{\overline{K_T}}{K_T}, & \text{при } N > 10^4 \end{cases}; \quad (4)$$

σ_a – амплітуда інтенсивності напружень,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (5)$$

σ_{-1} – межа втоми сталі при симетричному навантаженні;

σ_N – межа втоми сталі за певної асиметрії навантаження, характерної для даного пускового режиму,

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \frac{1+r}{1-r}}; \quad (6)$$

σ_B – межа міцності сталі на розтяг;

r – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження;

$\overline{K_T}$ – ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень:

$$\overline{K_T} = 1 + p(K_T - 1); \quad (7)$$

p – коефіцієнт чутливості матеріалу до концентрації напружень.

При підвищених температурах, коли проявляється повзучість матеріалу на номінальному режимі експлуатації, допустиме число циклів знаходиться за рівнянням:

$$N_d = \left[1 - \left| \frac{1,25\sigma^c}{\sigma_{д.м.}} \right|^q \right] \cdot \min \left\{ \frac{N_1}{n_N}; N_2 \right\}, \quad (8)$$

де σ^c – інтенсивність напружень в зоні, що досліджується за сталої повзучості;

$\sigma_{д.м.}$ – межа довготривалої міцності для моменту часу, визначеного заданими технічними умо-

вами;

q – показник степені в рівнянні довготривалої міцності:

$$t = B\sigma^{-q}. \quad (9)$$

$$\varepsilon_{a, \text{ппр}} = \frac{1+\nu}{1,5E} \left\{ C\sigma_a + \min(\sigma_{-1}; \sigma_{\text{д.п.}}) - \min(\sigma_N; \sigma_N^c) \right\}, \quad (10)$$

де σ_N^c – межа втоми сталі при несиметричному навантаженні і при сталій повзучості,

$$\sigma_N^c = \begin{cases} \min \left\{ \frac{\sigma_a \sigma_{\text{д.м.}}(T_1)}{|\sigma_{\text{max}}|}; \frac{\sigma_a \sigma_{\text{д.м.}}(T_2)}{|\sigma_{\text{max}} - 2\sigma_a|} \right\}, & \text{при } \sigma_a < \overline{\sigma_{0,2}^u}; \\ \min \left\{ \sigma_{\text{д.м.}}(T_1); \sigma_{\text{д.м.}}(T_2) \right\}, & \text{при } \sigma_a \geq \overline{\sigma_{0,2}^u} \end{cases}; \quad (11)$$

$\sigma_{\text{д.м.}}(T_1), \sigma_{\text{д.м.}}(T_2)$ – межі довготривалої міцності за строк експлуатації, що відповідають температурі T_1 і T_2 ;

T_1 і T_2 – температури, які відповідають максимальній $\varepsilon_{i \text{ max}}$ та мінімальній $\varepsilon_{i \text{ min}}$ інтенсивності деформації протягом циклу відповідно.

Сумарна пошкоджувальність, накопичена в металі роторів від сумісної дії повзучості при q' різних типів сталих режимів і циклічних навантажень при k' різних типів змінних режимів визначається з використанням гіпотези Пальмгрена-Майнера за рівнянням виду:

$$P' = P'_{\text{ст}} + P'_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}}, \quad (12)$$

де $P'_{\text{ст}}, P'_{\text{ц}}$ – статична та циклічна пошкоджувальність, накопичена в досліджуваній зоні ротора на момент дослідження допустимості продовження строку експлуатації;

t'_j – час роботи на j -ому сталому режимі за температури металу T'_j і еквівалентних місцевих напружень повзучості $(\sigma'_{ej})_{\text{max}}$;

t'_{pj} – час до настання граничного стану під дією еквівалентних місцевих напружень повзучості $(\sigma'_{ej})_{\text{max}}$ при температурі металу T'_j , який визначається за допомогою діаграми довготривалої міцності сталі 25X1M1ФА;

n'_l – число циклів l -го типу;

N'_{pl} – число циклів до появи втомних тріщин під дією тільки циклічних навантажень l -го типу;

q' – число різних типів сталих режимів, на момент оцінки, при температурі металу T'_j і сталих еквівалентних місцевих напружень повзучості $(\sigma'_{ej})_{\text{max}}$;

k' – число різних типів циклів, на момент оцінки, з різними амплітудами приведених деформацій ε'_{al} .

Штрихом відмічені всі величини, що стосуються попереднього періоду експлуатації до розрахунку залишкового ресурсу.

Якщо за даними електростанції не відоме розподілення пусків за типами, а лише відоме їх загальне число n за час до моменту оцінки, то накопичена циклічна пошкоджувальність $P'_{\text{ц}}$ визначається

Тоді приведена до симетричного ізотермічного циклу навантаження амплітуда інтенсивності деформацій [5]:

ся в запас по спрощеній формулі:

$$P'_{\text{ц}} = \frac{n}{N_p}, \quad (13)$$

де N_p – число циклів до появи втомної тріщини, що відповідає найбільш жорсткому режиму (режиму з максимальною амплітудою деформації ε_a).

Залишкове напрацювання до появи тріщини $[G]_{\text{зал}}$ визначається за формулою:

$$[G]_{\text{зал}} = \frac{1 - P'}{P'_r}, \quad (14)$$

де P'_r – прогнозована на наступний за оцінкою період експлуатації осереднена годинна пошкоджувальність (швидкість вичерпання ресурсу), яка буде накопичуватись в досліджуваній зоні ротора при чергуванні q'' типів сталих режимів та k'' типів циклів з різними циклічними навантаженнями.

Двома штрихами відмічені всі величини, що відносяться до періоду експлуатації після проведення розрахунку і продовження ресурсу.

Станом на 01.08.2021 р. напрацювання енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС становить 297 143 год. при сумарному числу пусків з різних теплових станів 1329. Попередній капітальний ремонт енергоблока проходив у період часу з березня до липня 2011 р. Від 31.07.2011 р. до 01.08.2021 р. енергоблок пропрацював 62 275 год. при 397 пусках.

Інформація щодо дольового розподілу пусків за тепловими станами наявна за період часу з грудня 1975 р. до поточного моменту та виглядає наступним чином: 231 пуск з холодних станів (20,6 %), 540 пусків з неостиглих станів (48,2 %) та 350 пусків з гарячих станів (31,2 %). Оскільки аналогічна статистика пусків за період з 1969 р. до 1975 р. відсутня, доцільно припустити, що протягом даного періоду енергоблок експлуатувався в приблизно аналогічному режимі.

Враховуючи вищевказане, можна вважати, що за весь час експлуатації енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС кількість пусків з холодних станів складає 274, з неостиглих станів – 640 та з гарячих – 415.

Розрахункове дослідження пошкодження та залишкового ресурсу ротора середнього тиску турбіни К-200-130 блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС

Динаміка зміни інтенсивності напружень в характерних областях протягом циклів пуску визначена на основі даних щодо напружено-деформованого стану для всіх моментів часу та представлена на рис. 1–4. Характерними зонами

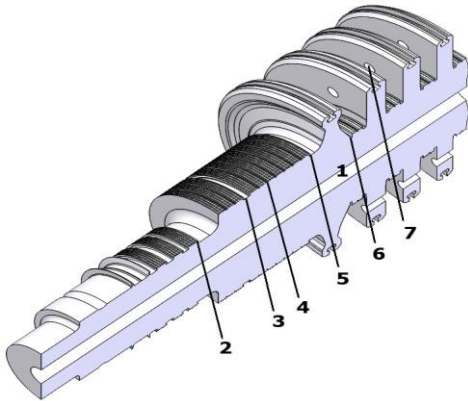


Рис. 1 – Характерні області дослідження ротора середнього тиску блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС

дослідження обрано наступні області ротора (рис. 1): 1 – осьовий отвір в зоні 13 ступеня; 2 – одинадцятий сегмент переднього кінцевого ущільнення (ПКУ); 3 – перша камера ПКУ; 4 – теплова канавка між 5-им і 6-им сегментами ущільнень; 5 – галтель між 1-им сегментом ущільнення і 13-им ступенем; 6 – галтель 13 ступеня з боку 14 ступеня; 7 – розвантажувальний отвір 15-го ступеня.

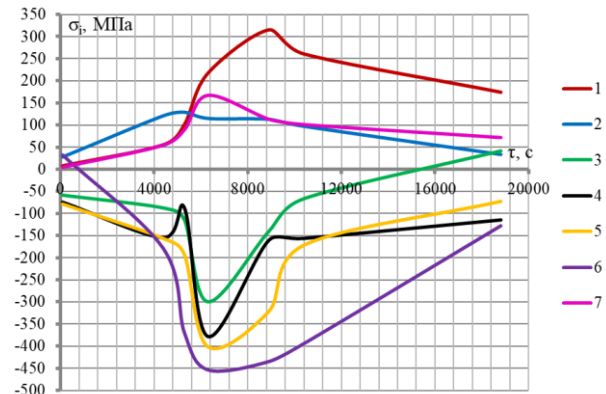


Рис. 2 – Динаміка зміни інтенсивності напружень в роторі при пуску з холодного стану

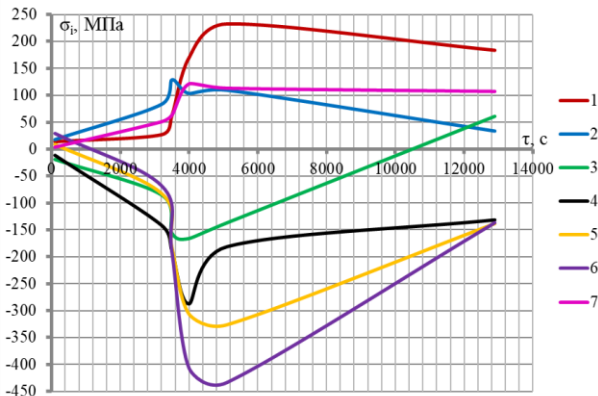


Рис. 3 – Динаміка зміни інтенсивності напружень в роторі при пуску з неостиглого стану

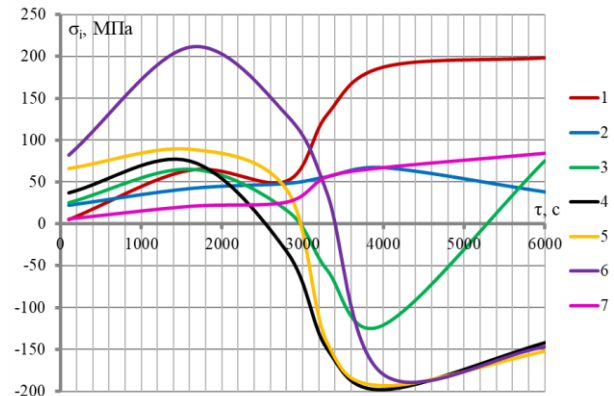


Рис. 4 – Динаміка зміни інтенсивності напружень в роторі при пуску з гарячого стану

Аналізуючи вказані дані можна зазначити, що при пускових режимах переважний обсяг часу область 1 (осьовий отвір в зоні 13 ступеня) працює в умовах високих розтягуючих зусиль, а області 2 (11-ий сегмент ПКУ) і 7 (розвантажувальний отвір 15-го ступеня) при більш помірних напруженнях.

Зони 3 (перша камера передніх кінцевих ущільнень), 4 (теплова канавка між 5-им і 6-им сегментами ущільнень) і 5 (галтельне заокруглення між 1-им сегментом ущільнення і 13-им ступенем), навпаки, зазнають високих стискуючих зусиль.

Окремо, слід відмітити складні умови експлуатації зони 6 (галтель 13 ступеня з боку 14 ступеня). Наприклад, при пуску з холодного стану амплітуда інтенсивності напружень протягом циклу складає $\sigma_a = 243,4$ МПа, що здатна сильно обмежити допустиме число циклів до руйнування. Додатково варто відзначити, що саме в цій області діагностовано кільцеву тріщину по всій окружності під час крайнього капітального ремонту енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС в 2021 р.

Використовуючи дані щодо динаміки зміни інтенсивності напружень в роторі середнього тиску блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС при пуску з різних теплових станів (рис. 1–4), були встановлені значення амплітуд напружень σ_a для всіх характерних областей. Додатково були встановлені і інші показники малоциклової втоми, що необхідні

для розрахунку приведеної до симетричного циклу навантаження амплітуди інтенсивності деформації $\varepsilon_{a.пр.}$.

Результати проведених розрахункових досліджень для всіх характерних областей та типів пуску представлені в табл. 1–3.

Значення амплітуди інтенсивності напружень σ_a та розрахункової температури $t_{ном}$ визначені за відповідними даними щодо теплового та напружено-деформованого стану ротора середнього тиску.

Значення модуля пружності E , межі міцності σ_B та межі втоми σ_{-1} при симетричному навантаженні встановлені експоненціальною апроксимацією [6] експериментальних даних щодо фізико-механічних властивостей сталі 25X1M1ФА наведених в [7]. Величини коефіцієнтів асиметрії r , межі втоми при поточній асиметрії навантаження σ_N та, відповідно, амплітуди інтенсивності деформації $\varepsilon_{a.пр.}$ є розрахунковими.

Таблиця 1 – Показники малоциклової втоми досліджуваних областей РСТ блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС при пуску з холодного стану

Область	σ_a , МПа	$t_{ном}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a.пр.}$, %
1	154,3	467	190,1	0,022	530,7	212,3	149,7	0,0989
2	50,5	200	210	0,217	619,7	247,9	152,9	0,0601
3	171,8	306	204,2	-1	608	243,2	243,2	0,0729
4	178,8	369	199,6	-1	591,5	236,6	236,6	0,0776
5	183,3	451	191,9	-1	545,4	218,1	218,1	0,0828
6	243,4	486	187,9	-1	509,9	204	204	0,1123
7	81,5	435	193,6	0,024	557,7	223,1	157,1	0,066

Таблиця 2 – Показники малоциклової втоми досліджуваних областей РСТ блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС при пуску з неостиглого стану

Область	σ_a , МПа	$t_{ном}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a.пр.}$, %
1	109,5	467	190,1	0,06	530,7	212,3	146,3	0,08
2	55	200	210	0,141	619,7	247,9	161,9	0,0582
3	113,5	306	204,2	-1	608	243,2	243,2	0,0482
4	138	369	199,6	-1	591,5	236,6	236,6	0,0599
5	167,5	451	191,9	-1	545,4	218,1	218,1	0,0757
6	231,5	486	187,9	-1	509,9	204	204	0,1068
7	58,5	435	193,6	0,033	557,7	223,1	156,3	0,0561

Таблиця 3 – Показники малоциклової втоми досліджуваних областей РСТ блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС при пуску з гарячого стану

Область	σ_a , МПа	$t_{ном}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a.пр.}$, %
1	96,5	467	190,1	0,025	530,7	212,3	149,4	0,0727
2	22,5	200	210	0,328	619,7	247,9	138,4	0,0545
3	98	306	204,2	-1	608	243,2	243,2	0,0416
4	136,5	369	199,6	-1	591,5	236,6	236,6	0,0593
5	141	451	191,9	-1	545,4	218,1	218,1	0,0637
6	195,5	486	187,9	-0,85	509,9	204	197,7	0,0931
7	56,4	435	193,6	0,051	557,7	223,1	154,6	0,0559

За встановленими значеннями амплітуди інтенсивності деформації $\varepsilon_{a.пр.}$ визначається допустиме число циклів пуску при розрахунковій температурі $t_{ном}$ (табл. 4). Для цього використовуються експериментальні криві малоциклової втоми сталі 25X1M1ФА представлені в [7].

При розрахунку допустимого числа циклів пуску розглядаються два випадки, які передбачають урахування коефіцієнтів запасу міцності на різному рівні (табл. 4, п. 1). Так, у першому випадку згідно з рекомендаціями [7] коефіцієнт запасу міцності по числу циклів складає $n_N = 5$, а по де-

формаціях – $n_\varepsilon = 1,5$. У другому випадку ці ж коефіцієнти прийняті на рівні $n_N = 3$ і $n_\varepsilon = 1,25$. Такі значення отримані у результаті експериментальних досліджень структури і властивостей металу з метою уточнення характеристик довготривалої міцності і запасів міцності по деформаціях n_ε і числу циклів n_N . Дані експериментальні дослідження на малоциклово втому були проведені для зразків сталі 25X1M1ФА ротора середнього тиску та сталі 15X1M1ФЛ корпусів ЦВТ і ЦСТ парової турбіни К-200-130 Луганської ТЕС ПАТ «Східенерго» [8].

Таблиця 4 – Ресурсні показники ротора середнього тиску блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС

№	Ресурсний показник	Значення	
1	Коефіцієнти запасу міцності по числу циклів n_N / по деформаціях n_ϵ	5 / 1,5	3 / 1,25
2	Допустимий час роботи на стаціонарних режимах, год.	370000	450000
3	Поточне напрацювання, год.	297143	
4	Поточна сумарна кількість пусків	1329	
5	Поточна кількість пусків за тепловими станами	ХС	274
		НС	640
		ГС	415
6	Інтенсивність напружень на номінальному режимі роботи, МПа	122,9	
7	Допустиме число циклів пуску	ХС	4110
		НС	4700
		ГС	6060
8	Циклічна пошкоджуваність, %	27,14	17,42
9	Статична пошкоджуваність, %	80,31	66,03
10	Сумарна пошкоджуваність, %	107,44	83,46
11	Залишковий ресурс, год.	-	58900

Зразки роторної сталі 25X1M1ФА були вирізані з ротора середнього тиску турбіни К-200-130 блока № 15 Луганської ТЕС, напрацювання для якого складо 275 031 годин при загальному числі пусків 1182. При цьому, пуски здійснювались з наступних теплових станів: пуски з НС-1,2 у кількості 853 (72 %) і пуски з ХС у кількості 329 (28 %). Місця вирізки зразків виконано в областях виникнення максимальних напружень в роторі середнього тиску.

Аналіз реального стану сталі 25X1M1ФА показав, що по числу циклів до руйнування деградація її властивостей (до 38 %) не перевищує допустиму межу (до 40 %) в усьому досліджуваному діапазоні амплітуд деформацій (від 0,12 до 2,14 %). В той же час, по деформаціях допустима межа зниження циклічної міцності (до 17 %) має місце в діапазоні амплітуд деформацій від 0,0 до 0,493 %. Відповідно, для цієї сталі у зазначеному діапазоні амплітуд напружень, коефіцієнти запасу міцності по числу циклів і деформацій можуть бути прийняті на рівні $n_N = 3$ і $n_\epsilon = 1,25$ [8].

При визначенні статичної пошкоджуваності згідно рекомендацій СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011 [3] допустимий час роботи роторної сталі визначається за експериментальними діаграмами довготривалої міцності і складає 370 тис. год.

З урахуванням проведених експериментальних досліджень КПІ ім. Ігоря Сікорського та Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України [8] допустимий час роботи металу можна прийняти на рівні 450 тис. год., тоді індивідуальний залишковий ресурс збільшиться. Такий підхід можна допустити, враховуючи позитивне рішення експертної комісії, що складається згідно [2] з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій.

Слід також мати на увазі, що реальні значення пошкоджуваності можуть мати тенденцію до збільшення з наступних причин [9]:

– зупинки з примусовим розхолодженням можуть збільшувати амплітуду напружень;

– при напрацюванні обладнання більш ніж 200 тис. годин має місце деяка деградація властивостей металу;

– відхилення реальних пускових графіків від графіків, що визначені інструкцією з експлуатації за рахунок впливу людського та інших факторів;

– відсутність повних даних про фізико-механічний стан сталі ротора в даний момент експлуатації.

Таким чином, сумарна пошкоджуваність металу ротора середнього тиску турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС дорівнює 107 %, при коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 5 і 1,5, а також при допустимому часі роботи металу 370 тис. год. Якщо сумарна пошкоджуваність металу ротора більше 100 %, то подальша експлуатація обладнання неможлива згідно рекомендацій СОУ-Н МЕН 40.1-21677681-52:2011 і ресурс вважається вичерпаним [3].

При коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 3 і 1,25, а також допустимому терміну роботи металу 450 тис. год. сумарна пошкоджуваність металу ротора ЦСТ знаходиться на рівні 83 %. Залишковий ресурс металу ротора ЦСТ турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС складе до 58908 год.

Запаси короточасної статичної міцності роторів ніде не виходять за межі допустимих (n'_1 , $n''_1 \geq 1,6$), що дозволяє продовжити подальшу експлуатацію.

Якщо експертна комісія, що складається згідно СОУ-Н МЕН 40.17.401:2004 [2] з представників електричної станції, спеціалізованих і інших організацій, може допустити зниження коефіцієнтів запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях до 3 і 1,25 відповідно, а також прийняти допустимий час роботи металу на рівні 450 тис. год., то індивідуальний залишковий ресурс металу ротора ЦСТ турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС може бути продовжений на 50 тис. год. при додатковому числі пусків, що

дорівнює половині паркового, а саме 400 пусків [2, 3].

Висновки

Енергоблок № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС введено в експлуатації в 1969 р. Станом на 01.08.2021 р. напрацювання його ротора середнього тиску становить 297 143 год. при сумарному числу пусків з різних теплових станів 1329.

В роботі представлено математичну модель розрахунку ресурсних показників обертового обладнання ТЕС, що працює в умовах високих температур.

За результатами проведених розрахункових досліджень встановлено, що найбільш навантажувальні областями ротора середнього тиску блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС є осьовий отвір валу в області регулюючого ступеня, терморозвантажувальні канавки перших сегментів передніх кінцевих ущільнень та галтельні переходи між полотном диску регулюючого ступеня та валу.

Сумарна пошкоджувальність металу ротора середнього тиску турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС дорівнює 107 %, при коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 5 і 1,5, а також при допустимому часі роботи металу 370 тис. год. Оскільки сумарна пошкоджувальність металу ротора більше 100 %, то подальша експлуатація обладнання неможлива і ресурс вважається вичерпаним.

За результатами виконаних раніше авторами експериментальних досліджень структури і властивостей сталі 25Х1М1ФА ротора середнього тиску блока № 15 Луганської ТЕС, з напрацюванням 275 031 годин при загальному числі пусків 1182 виконано уточнення характеристик довготривалої міцності і запасів міцності по деформаціях n_ϵ і числу циклів n_N . Застосовуючи аналогічний досвід для РСТ блока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС, при коефіцієнтах запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях на рівні 3 і 1,25 накопичене пошкодження в металі ротора за циклічними механізмами руйнування складає 17,4 %. Статичне пошкодження становить 66 %. Таким чином, сумарна пошкоджувальність металу знаходиться на рівні 83 %, що встановлює залишковий ресурс ротора середнього тиску турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС на рівні 58908 год.

Якщо експертна комісія може допустити зниження коефіцієнтів запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях до 3 і 1,25 відповідно, а також прийняти допустимий час роботи металу на рівні 450 тис. год., то допустимий термін експлуатації ротора ЦСТ турбоагрегату К-200-130 енергоблока № 11 ДТЕК Бурштинська ТЕС може бути

продовжений на 50 тис. год. при додатковому числі пусків – 400.

Список літератури

1. Chernousenko O. Yu., Rindyuk D. V., Peshko V. A. (2018), "Features of Prolongation of the Service Life of High- and Intermediate-Pressure Rotors of K-200-130 Steam Turbine of Luhansk TPP", *The Problems of General Energy*, no. 53, pp. 65-70, ISSN 2522-4344, doi: 10.15407/pge2018.02.065.
2. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. – Офіц. вид. – Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
3. НД МПЕ України. Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбін: СОУ-Н МПЕ 40.1-21677681-52:2011. Методичні вказівки / М. Г. Шульженко. – Офіц. вид., Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2011. – 27 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
4. Металграфічні методи дослідження елементів теплоенергетичного устаткування. Положення: СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009. – Офіц. вид. – Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2009. – 69 с.
5. Chernousenko O. Yu., Peshko V. A. (2017), "Computation investigation of the thermal and stress-strain behavior of the rotor of high pressure turbine T-100/120-130; block No. 1 operated by the PJSC Kharkiv CHPP-5", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 34-40, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.
6. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Goryazhenko V., Chernov O. (2020), "Development of a System for Estimating and Forecasting the Rational Resource-Saving Operating Modes of TPP", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no 8(105), pp. 14-23, ISSN 1729-3774, doi: 10.15587/1729-4061.2020.204505.
7. РТМ 108.021.103-85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – Москва, 1985. – № АЗ-002/7382. – 49 с.
8. Оценка остаточного ресурса и продление эксплуатации паровых турбин большой мощности. Часть 2: моногр. / О. Ю. Черноусенко. – Харьков: ФОП Бровин А. В., 2017. – 207 с. – ISBN 978-617-7555-06-2.
9. Chernousenko O., Peshko V. (2019), "Assessment of Resource Parameters of the Extended Operation High-Pressure Rotor of the K-1000-60/3000 Turbine", *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 41-47, ISSN 2411-0779, doi: 10.15407/pmach2019.04.041.

References (transliterated)

1. Chernousenko O. Yu., Rindyuk D. V., Peshko V. A. (2018), "Features of Prolongation of the Service Life of High- and Intermediate-Pressure Rotors of K-200-130 Steam Turbine of Luhansk TPP", *The Problems of General Energy*, no. 53, pp. 65-70, ISSN 2522-4344, doi: 10.15407/pge2018.02.065.
2. (2005), *ND MPE Ukrainy. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatatsii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostancij: SOU-N MPE 40.17.401:2004* [ND of MFE of Ukraine. Metal control and extension of the service life of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2004], GRIFRE, M-vo palyva ta energetyky Ukrainy, Kyiv, 76 p.
3. Shul'zhenko M. G. (2011), *ND MPE Ukrainy. Vyznachenja rozrakhunkovogo resursu ta ocinky zhuvchosti rotoriv ta korpusnyh detalej turbiny: SOU-N MPE 40.1-21677681-52:2011* [ND of MFE of Ukraine. Determination of the calculated resource and assessment of the survivability of turbine rotors

- and casing parts: SOU-N MEV 40.1-21677681-52:2011], GRIFRE, M-vo palyva ta energetyky Ukrainy, Kyiv, 27 p.
4. (2009), Metalografichni metody doslidzhennja elementiv teploenergetychnogo ustatkuvannja. Polozhennja: SOU-N EE 20.321:2009 [Metallographic methods of research of elements of thermal power equipment. Position: SOU-N EE 20.321:2009], GRIFRE, M-vo palyva ta energetyky Ukrainy, Kyiv, 69 p.
 5. Chernousenko O. Yu., Peshko V. A. (2017), "Computation investigation of the thermal and stress-strain behavior of the rotor of high pressure turbine T-100/120-130; block No. 1 operated by the PJSC Kharkiv CHPP-5", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 34–40, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.
 6. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Goryazhenko V., Chernov O. (2020), "Development of a System for Estimating and Forecasting the Rational Resource-Saving Operating Modes of TPP", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no 8(105), pp. 14–23, ISSN 1729-3774, doi: 10.15587/1729-4061.2020.204505.
 7. (1985), RTM 108.021.103. Detali parovyh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost' [Details of stationary steam turbines. Calculation for low-cycle fatigue], Moscow, no AZ-002/7382, 49 p.
 8. Chernousenko O. Ju. (2017), Ocenka ostatochnogo resursa i prodlenie jekspluatacii parovyh turbin bol'shoj moshhnosti. Ch. 2 [Estimation of the residual life and extension of the operation of steam turbines of high power. Part 2], Kharkiv, 207 p., ISBN 978-617-7555-06-2.
 9. Chernousenko O., Peshko V. (2019), "Assessment of Resource Parameters of the Extended Operation High-Pressure Rotor of the K-1000-60/3000 Turbine", *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 41-47, ISSN 2411-0779, doi: 10.15407/pmach2019.04.041.

Надійшла (received) 05.01.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Черноусенко Ольга Юрївна (Chernousenko Olga) – доктор технічних наук, професор, КПП ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (050) 413–40–50; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

Риндюк Дмитро Вікторович (Rindyuk Dmitro) – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (099) 055–47–04; e-mail: reletive@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7770-7547>. Scopus 57193402888.

Пешко Віталій Анатолійович (Peshko Vitalii) – кандидат технічних наук, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>. Scopus 57194077095.