

УДК 621.165.62

ОЦІНКА РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ РОТОРА ВИСОКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ К-1000-60/3000 ПРИ ПРОДОВЖЕННІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Ю. Черноусенко,

д-р техн. наук

chernousenko20a@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1427-8068

В. А. Пешко,

канд. техн. наук

vapeshko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0610-1403

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, Україна, м. Київ,
пр. Перемоги, 37

Надійшла робота атомних електростанцій (АЕС) є передумовою сталого розвитку енергетичного сектора України. На поточному етапі напрацювання значної частки паротурбінного устаткування АЕС наближається до свого паркового значення. Продовження експлуатації АЕС понад парковий ресурс потребує проведення перевірних розрахунків залишкового ресурсу його основних елементів. Розроблена модель оцінки ресурсних показників ротора високого тиску парової турбіни К-1000-60/3000. На базі тривимірної просторової аналогу розраховано розрахунок теплового та напружено-деформованого стану ротора високого тиску для всіх типових експлуатаційних режимів роботи. Встановлено, що зонами концентрації напружень є галтельні скруглення та розвантажувальні отвори перших ступенів, а також осьовий отвір турбіни в області четвертого та п'ятого ступенів. Розрахунок темпів накопичення циклічного пошкодження в основному металі проведено з використанням кореляційних залежностей малоциклової втоми, оскільки експериментальні дані щодо опірності сталі 30ХНЗМ1ФА, з якої виготовлено ротор, в літературі відсутні. Розраховано допустимі значення чисел циклів пуску з різних теплових станів та допустимого часу роботи за стаціонарних режимів експлуатації. Для ротора високого тиску енергоблока № 3 Рівненської АЕС (РАЕС) оцінено рівень накопиченої циклічної та статичної пошкоджуваності. Встановлено, що вичерпання довготривалої міцності сталі як механізм руйнування має домінуючий вплив на ресурсні показники досліджуваного об'єкта порівняно з малоцикловою втомою. Статична складова накопиченої пошкоджуваності ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 блока № 3 РАЕС $P_{ст}=77\%$, циклічна $P_{ц}=11\%$. Індивідуальний залишковий ресурс складає 26287 годин, що дозволяє продовжити термін експлуатації ротора високого тиску на додаткові 25 тисяч годин.

Ключові слова: атомна електростанція, продовження експлуатації, залишковий ресурс, парова турбіна, малоциклова втома, довготривала міцність.

Вступ

З урахуванням вичерпання ресурсу енергетичного обладнання теплових електростанцій (ТЕС) та АЕС, а також дефіциту органічного палива на теплових електростанціях надійність роботи ядерної енергетики створює передумови сталого розвитку енергетичної галузі України. Виробіток електроенергії вітчизняними АЕС складає близько 50%.

Згідно з Програмою продовження термінів експлуатації енергетичного обладнання АЕС України, з п'ятнадцяти діючих енергоблоків продовжено термін експлуатації на 10–20 років на енергоблоках № 1, 2 РАЕС, Запорізької АЕС (ЗАЕС), Южно-Української АЕС (ЮУАЕС). Досвід проведених робіт показав, що питомі фінансові витрати на виконання вимог нормативних документів, які забезпечують можливість отримання ліцензії на експлуатацію енергоблоків в період додаткового терміну служби, значно менше витрат на будівництво нових енергоблоків.

У 2017–2018 рр. спливає термін експлуатації енергоблоків № 3 РАЕС, № 3, 4 ЗАЕС та № 1 Хмельницької АЕС. До 2020 року спливає термін проектної експлуатації атомних енергоблоків № 3 ЮУАЕС та № 5 ЗАЕС. Продовження термінів експлуатації енергоблоків АЕС після завершення проектного терміну експлуатації за умови виконання норм ядерної та радіаційної безпеки є одним з найбільш ефективних шляхів для часткового вирішення проблеми заміщення генеруючих потужностей.

Перегляд раніше встановлених термінів служби енергетичного обладнання енергоблоків АЕС передбачає оцінку залишкового ресурсу енергетичного обладнання згідно з нормативними документами [1–5].

Мета й завдання дослідження

Метою даної роботи є розрахункове дослідження ресурсних показників ротора циліндра високого тиску (РВТ) парової турбіни К-1000-60/3000 блока 1000 МВт державного підприємства НАЕК «Енергоатом» під час експлуатації понад парковий ресурс згідно з нормативними документами [2, 5].

Для досягнення поставленої мети у роботі виконано:

- розрахункове дослідження залишкового ресурсу та допустимої кількості пусків з різних теплових станів при циклічному навантаженні РВТ парової турбіни К-1000-60/3000;
- розрахункове дослідження залишкового напруження при статичному навантаженні РВТ парової турбіни К-1000-60/3000;
- оцінка можливості подальшого продовження експлуатації понад парковий ресурс РВТ парової турбіни К-1000-60/3000.

Об'єкт дослідження та особливості числової моделі

Об'єкт дослідження – 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 (ЦВТ) розташований в середній частині турбіни, а циліндри низького тиску – симетрично по обидві сторони ЦВТ. Детальний опис об'єкта дослідження наведено в роботі [6].

Дослідження теплового стану РВТ передбачає розв'язання крайової задачі нестационарної теплопровідності, для чого задаються граничні умови теплообміну на поверхнях об'єкта, згідно з розробленим програмним комплексом [7]. Враховувалися схеми витоків пари в проточній частині та в ущільненнях, а також реальні графіки роботи за типових експлуатаційних режимів, а саме, стаціонарного та пусків з холодного, неостиглого та гарячого станів. Для конструктивно-складного ротора ЦВТ геометрична модель виконана у тривимірній постановці з урахуванням основних конструктивних елементів. Модель створена на основі паспортного креслення турбіни К-1000-60/3000.

Напружено-деформований стан (НДС) оцінювався у пружно-пластичній постановці з використанням скінченноелементного методу дискретизації розрахункової області. Враховувалися основні типи напружень, а саме, температурні, нерівномірність температурних полів, напруження від тиску та відцентрові сили. Результати розрахунку теплового та напружено-деформованого станів РВТ за типових режимів експлуатації наведені в роботі [6].

Розрахункова оцінка накопиченої циклічної пошкоджуваності турбінного обладнання, відповідно до нормативних документів [2, 4], повинна виконуватись за допустимими числами циклів пуску з різних теплових станів. Для цього застосовуються експериментальні криві малоциклової втоми для конкретної сталі, з якої виготовлено досліджуваний елемент турбіни.

Ключовою особливістю розрахункової моделі є те, що експериментальні криві малоциклової втоми для сталі 30ХНЗМ1ФА, з якої виготовлений об'єкт дослідження, в літературі відсутні, тому пропонується вести розрахунок допустимого числа циклів за кореляційними залежностями малоциклової втоми [4]

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

$$N_{1,2} = \left[\frac{\frac{1}{4} \ln \frac{100}{100 - \Psi_{д.п.}}}{C \left(n_{1,2} \varepsilon_a + \frac{1-2\nu}{3E} \sigma_i \right) - \frac{\sigma_N}{E}} \right]^{0,6},$$

де σ^c – інтенсивність напружень в стані сталої повзучості; $\sigma_{д.м.}$ – межа довготривалої міцності; q – показник ступеня в рівнянні довготривалої міцності; n_N – запас міцності за числом циклів; $\Psi_{д.п.}$ – довготривала пластичність, що визначається за медіанними значеннями для кожного рівня температур $\theta_1 - \theta_2$; θ_1 і θ_2 – температури, що відповідають максимальній та мінімальній інтенсивності деформації в

циклі навантаження; C – коефіцієнт поточного числа циклів $C = \begin{cases} 1, & \text{при } N \leq 10^4 \\ \frac{\bar{K}_T}{K_T}, & \text{при } N > 10^4 \end{cases}$; $n_1=1$; $n_2=n_e$ – кое-

фіцієнти запасу міцності; ε_a – амплітуда інтенсивності деформації в циклі

$\varepsilon_a = \frac{1+\nu}{1,5 \cdot E} [C \cdot \sigma_a + \min(\sigma_{-1}; \sigma_{\text{д.м.}}) - \bar{\sigma}_N]$; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга для максимальної

температури в циклі t_m ; $\bar{\sigma}_N = \min\{\sigma_N; \sigma_N^c\}$ – межа втоми при несиметричному циклі навантаження;

$\sigma_N = \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \frac{1+r}{1-r}}$, $\sigma_N^c = \begin{cases} \min\left\{\frac{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{д.м.}}(\theta_1)}{|\sigma_{\text{max}}|}, \frac{\sigma_a \cdot \sigma_{\text{д.м.}}(\theta_2)}{|\sigma_{\text{max}} - 2 \cdot \sigma_a|}\right\}, & \text{при } \sigma_a < \bar{\sigma}_{0,2}^{\text{II}} \\ \min\{\sigma_{\text{д.м.}}(\theta_1); \sigma_{\text{д.м.}}(\theta_2)\}, & \text{при } \sigma_a \geq \bar{\sigma}_{0,2}^{\text{II}} \end{cases}$; r – коефіцієнт асиметрії циклу

навантаження; $r = \begin{cases} \max\left\{\frac{\sigma_{\text{max}} - 2\sigma_a}{\sigma_{\text{max}}}, -1\right\}, & \text{при } \sigma_{\text{max}} > 0 \\ -1, & \text{при } \sigma_{\text{max}} \leq 0 \end{cases}$; $\sigma_{\text{д.м.}}(\theta_1)$, $\sigma_{\text{д.м.}}(\theta_2)$ – межі довготривалої міцності,

що відповідають температурам θ_1 і θ_2 ; σ_{max} – максимальна напруженість в циклі; σ_a – амплітуда інтенсивності напружень; $\bar{\sigma}_{0,2}^{\text{II}}$ – середнє значення зведених до розрахункової температури циклічних меж текучості матеріалу за температур θ_1 і θ_2 .

Розрахункова оцінка залишкового ресурсу та допустимої кількості пусків для РВТ

Оцінка ресурсних показників енергетичного устаткування виконується на базі розрахунку статичної та циклічної пошкоджуваності металу. Для цього необхідно мати дані щодо теплового та напружено-деформованого станів ротора за всіх типових режимів експлуатації турбіни.

Тепловий та напружено-деформований стан для стаціонарного режиму роботи виконано у квазістаціонарній постановці [6]. Рівень температур складає 270 °С для першого ступеня та 165–228 °С з другого по четвертий ступені. Максимальна інтенсивність напружень σ_i спостерігається в осьовому отворі та в розвантажувальних отворах дисків всіх п'яти ступенів і дорівнює 158 МПа. В інших характерних зонах РВТ інтенсивність напружень складає 66–105 МПа. Високий рівень інтенсивності напружень в області осьового отвору пояснюється великими значеннями відцентрових сил, що діють на значні зосередження маси, якими є диски ступенів тиску та їх робочі лопатки. За такої умови найбільший рівень напружень спостерігається ближче до п'ятого ступеня, який є найбільш масивним та облопачений найважчими лопатками (рис. 1).

Пускові режими роботи розглянуті у нестационарній постановці. Особливий інтерес на змінних

режимах роботи становить інформація щодо нерівномірності температурних полів у часі, яка зображена у вигляді динаміки зміни градієнта температур для найбільш характерних областей [6].

Так, для пуску з холодного стану градієнт температур досягає свого максимального значення на початкових етапах пуску і для певних досліджуваних областей дорівнює 1200 К/м. В цілому, рівень значень градієнта температур не перевищує 1300 К/м протягом пуску з холодного стану, що свідчить про помірну нерівномірність температурного поля.

Щодо напружено-деформованого стану слід відзначити, що найвищі за модулем значення інтенсивності напружень спостерігаються на початкових етапах пуску з холодного стану і дорівнюють

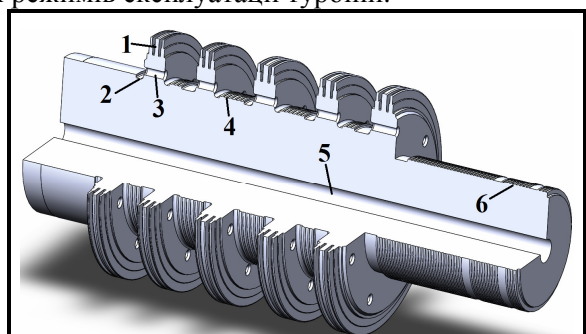
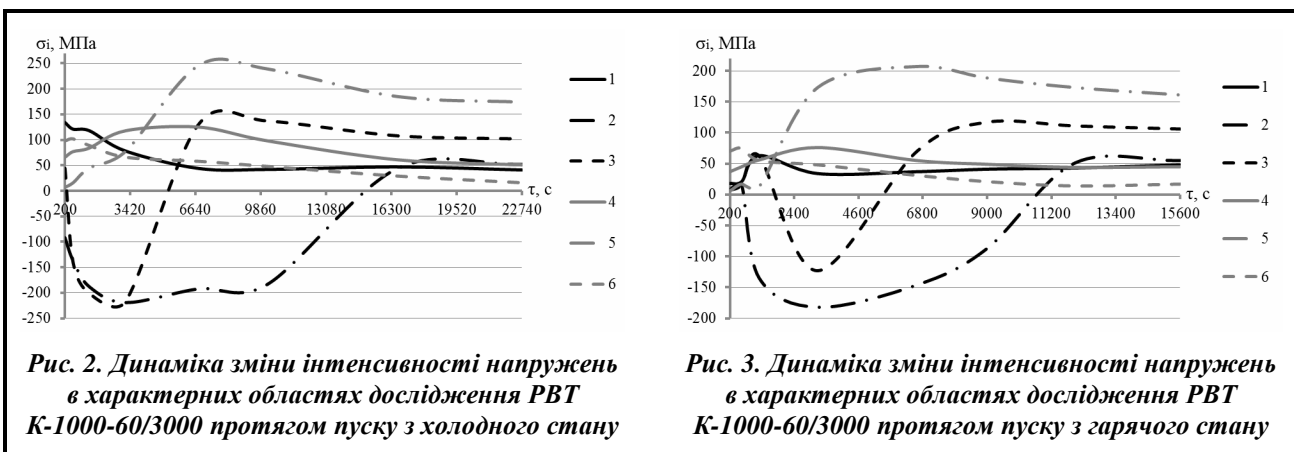


Рис. 1. Характерні області дослідження ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000:

- 1 – хвостове кріплення 1-го ступеня;
- 2 – галтель 1-го ступеня з боку паровпуску;
- 3 – розвантажувальний отвір 1-го ступеня;
- 4 – діафрагмові ущільнення 2-го ступеня;
- 5 – осьовий отвір в області 4-го і 5-го ступенів;
- 6 – другий ступінь кінцевих ущільнень

231 МПа для розвантажувальних отворів диска першого ступеня (рис. 2). Ці значення зберігаються майже незмінними до моменту часу 6800 с, починаючи з якого спостерігається поступове зменшення загального рівня напружень безпосередньо до завершення пускового етапу турбіни. Починаючи з 6800 с частота обертання турбіни сягає свого номінального значення (3000 об/хв), і зонами високих напружень стають галтельні переходи дисків ступенів та осьовий отвір ротора (рис. 2).

Аналогічні дані отримано і для режиму пуску з гарячого стану (рис. 3). Проведені розрахунки дозволяють оцінити довготривалу міцність та стійкість до малоциклової втоми основного металу ротора. Для цього було обрано РВТ К-1000-60/3000 блока № 3 РАЕС.



Ресурсні паркові характеристики турбіни К-1000-60/3000 згідно з даними НАЕК «Енергоатом» є такими: термін експлуатації – не менше 30 років, допустима паркова кількість пусків – 600, кількість пусків впродовж року – 20. Термін експлуатації розрахований для досягнення граничного стану виходячи з забезпечення максимально допустимої кількості циклів у рік.

Під час проведення планово-попереджувальних ремонтних робіт на енергоблоці № 3 РАЕС у 2014 р. показники напрацювання за період експлуатації склали (станом на 01.07.2014 р.): загальна кількість пусків – 230, кількість пусків з холодного стану – 49, кількість пусків з гарячого стану – 181, напрацювання – 177919 годин. Таким чином, у відсотковому співвідношенні кількість пусків з холодного стану становить 21,3%, кількість пусків з гарячого стану – 78,7%. Якщо припустити, що енергоблок наступні п'ять років експлуатували в аналогічному режимі, то станом на липень 2019 року напрацювання мало складати 209690 годин, загальна кількість пусків – 271, кількість пусків з холодного стану – 58, з гарячого стану – 213.

Згідно з даними НАЕК «Енергоатом» допустимий парковий термін експлуатації складає не менше 30 років, що відповідає для базових енергоблоків 220 тисяч годин експлуатації. Коефіцієнти запасу міцності в розрахунках прийняті відповідно 10 для запасу міцності за кількістю циклів та 1,5 для запасу міцності за деформаціями згідно з нормативними документами [4].

Результати розрахункового дослідження ресурсних характеристик РВТ турбіни К-1000-60/3000 блока № 3 РАЕС наведені нижче. Малоциклова втома оцінена за допустимими значеннями чисел пуску з різних теплових станів, що були розраховані з використанням кореляційних залежностей втомлюваності сталі 30ХНЗМ1ФА, з якої виготовлений РВТ [4]. Розрахована циклічна пошкоджуваність основного металу $P_{ц}$ становить 11%, при цьому розрахована статична пошкоджуваність $P_{ст}$ дорівнює 95%. Це прогнозовано свідчить про менш вагомий вплив малоциклової втоми як механізму руйнування ротора порівняно з вичерпанням довготривалої міцності.

Статична пошкоджуваність оцінена за парковим ресурсом 220 тисяч годин згідно з нормативними документами [5] дорівнює 95%. Сумарна пошкоджуваність основного металу становить 107%, тобто перевищує 100%. Це свідчить про вичерпання ресурсу РВТ турбіни К-1000-60/3000 при парковому напрацюванні 220 тисяч годин.

Ресурсні характеристики ротора високого тиску турбіни К-1000-60/3000 блока № 3 Рівненської АЕС

| Ресурсні характеристики | Значення | |
|---|------------------|--------------|
| Напрацювання енергоблока | 209690 годин | |
| Загальне число пусків | 271 | |
| Річне напрацювання | 6354 годин/рік | |
| Рік введення в експлуатацію | 1986 | |
| Поточне число пусків з різних теплових станів | ХС | 58 |
| | ГС | 213 |
| Інтенсивність напружень на номінальному режимі роботи | 158,5 МПа | |
| Допустиме число циклів пуску з різних теплових станів | ХС | 1945 |
| | ГС | 2591 |
| Циклічна пошкоджуваність | 11,2% | |
| Допустиме число годин роботи | 220000 годин | 270000 годин |
| Статична пошкоджуваність | 95,4% | 77,66% |
| Сумарна пошкоджуваність | 106,6% | 88,86% |
| Залишковий ресурс | <0 годин | 26287 годин |
| | Ресурс вичерпано | |

Авторами статті були проведені експериментальні дослідження довготривалої міцності сталі 25Х1М1ФА за температури 500 °С, що застосовується під час виготовлення роторів високого та середнього тиску турбін К-200-130 [7, 8]. Результати досліджень виявили можливість збільшення допустимого числа годин роботи до 370 тисяч годин.

Аналогічні дані щодо сталі 30ХНЗМ1ФА, з якої виготовлено РВТ турбіни К-1000-60/3000, у літературі відсутні. Зрозумілим є те, що через відмінність фізико-механічних властивостей сталей 25Х1М1ФА та 30ХНЗМ1ФА їхні криві довготривалої міцності також будуть відрізнятися. Проте, враховуючи, що робоча температура металу РВТ турбіни К-200-130 становить 540 °С, а турбіни К-1000-60/3000 дорівнює 270 °С, пропонується виконати оцінку статичної пошкоджуваності РВТ блока № 3 РАЕС з застосуванням кривих довготривалої міцності сталі 25Х1М1ФА за температури 500 °С як розрахунок в запас міцності. Додатково слід врахувати, що до турбін АЕС висуваються вищі вимоги щодо надійності роботи. Тому пропонується прийняти допустиме число годин експлуатації сталі РВТ турбіни К-1000-60/3000 на рівні 270 тисяч годин. Тоді розрахована статична пошкоджуваність $P_{ст}$ дорівнюватиме 78%, а сумарна пошкоджуваність основного металу $P_{сум}$ становитиме 89%.

Якщо експертна комісія, що складається згідно з СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004 [1] з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій, може прийняти допустимий час роботи металу на рівні 270 тисяч годин, то розрахована сумарна пошкоджуваність $P_{сум}=89\%$, а залишковий ресурс металу РВТ турбоагрегату К-1000-60/3000 енергоблока № 3 РАЕС складе 26287 годин. Це дозволить продовжити експлуатацію РВТ парової турбіни К-1000-60/3000 на 25 тисяч годин.

Висновки

1. Для парової турбіни К-1000-60/3000 розроблено модель розрахунку теплового та напружено-деформованого станів РВТ на базі 3D-просторового аналогу. Встановлено, що зонами концентрації напружень є галтельні скруглення та розвантажувальні отвори перших ступенів, а також осьовий отвір ротора в області четвертого та п'ятого ступенів.

2. Визначено, що для РВТ домінуючий вплив на напружено-деформований стан має відцентрова сила, що діє на масивні обертові елементи турбіни. Встановлено, що максимальне значення інтенсивності напружень на стаціонарному режимі роботи виникає в області осьового отвору вала під п'ятим ступенем тиску і складає 158 МПа.

3. Під час пуску з холодного стану максимальний рівень інтенсивності напружень ($\sigma_t=263$ МПа) виникає в момент часу 1400 с і пов'язаний із взаємодією температурних напружень та нерівномірністю температурного поля. Під час пуску з гарячого стану максимальний рівень інтенсивності напружень ($\sigma_t=226$ МПа) виникає в момент часу 3200 с в області осьового отвору вала.

4. За результатами проведення числових досліджень ресурсних показників РВТ турбіни К-1000-60/3000 сумарна пошкоджуваність складає 107%, в тому числі циклічна пошкоджуваність – 11%

та статична – 95% при парковому напрацюванні 220000 годин. Таким чином, подальша експлуатація РВТ блока № 3 РАЕС не допускається.

5. Якщо експертна комісія, що складається згідно з СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004 [1] з представників електричної станції, спеціалізованих та інших організацій, може прийняти допустимий час роботи металу на рівні 270 тисяч годин, то залишковий ресурс металу РВТ турбоагрегату К-1000-60/3000 енергоблока № 3 РАЕС складе 26287 годин. Це дозволить продовжити експлуатацію РВТ парової турбіни К-1000-60/3000 на 25 тисяч годин.

Література

1. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. Офіц. вид. М-во палива та енергетики України. К.: ГРІФРЕ., 2005. 76 с.
2. СОУ-Н МПЕ 40.1-21677681-52:2011 Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбіни: методичні вказівки / М. Г. Шульженко. Офіц. вид. Міненерговугілля України. К., 2011. 24 с.
3. РТМ 108.020.16-83. Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин. Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, 1983. 112 с.
4. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. 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. М., 1996. 98 с.
6. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В. А. Напружено-деформований стан ротора турбіни К-1000-60/3000 при типових режимах експлуатації. *Вісн. НТУ «ХПИ»*. Сер. Енергетичні та теллотехнічні процеси й устаткування. 2019. № 3 (1328). С. 4–10. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.01>.
7. Peshko V., Chernousenko O., Nikulenkova T., Nikulenkov A. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines. *Propulsion and Power Research*. China: National Laboratory for Aeronautics and Astronautics. 2016. Vol. 5. Iss. 4. P. 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2016.11.008>.
8. Chernousenko O., Butovsky L., Rindyuk D., Granovska O., Moroz O. Analysis of residual operational resource of high-temperature elements in power and industrial equipment. *Eastern-European J. Enterprise Technologies – Energy-saving technologies and equipment*. 2017. Vol. 1. No. 8 (85). P. 20–26. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.92459>.

Надійшла до редакції 06.11.2019

Оценка ресурсных показателей ротора высокого давления турбины К-1000-60/3000 при продлении эксплуатации

О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
03056, Украина, г. Киев, пр. Победы, 37

Надежная работа атомных электростанций (АЭС) является условием устойчивого развития энергетического сектора Украины. На текущем этапе наработка значительной части паротурбинного оборудования АЭС приближается к своему парковому значению. Продление эксплуатации атомных электростанций свыше паркового ресурса требует проведения поверочного расчета остаточного ресурса его основных элементов. Разработана модель оценки ресурсных показателей ротора высокого давления паровой турбины К-1000-60/3000. На базе трехмерного пространственного аналога выполнен расчет теплового и напряженно-деформированного состояния ротора высокого давления для всех типичных эксплуатационных режимов работы. Установлено, что зонами концентрации напряжений являются галтельные переходы и разгрузочные отверстия первых ступеней, а также осевое отверстие турбины в области четвертой и пятой ступеней. Расчет темпов накопления циклической поврежденности в основном металле выполнен с использованием корреляционных зависимостей малоциклового усталости, поскольку экспериментальные данные касательно сопротивляемости стали 30ХНЗМ1ФА, из которой изготовлен ротор, в литературе отсутствуют. Рассчитаны допустимые значения чисел циклов пуска из различных тепловых состояний и допустимое время работы при стационарных режимах эксплуатации. Для ротора высокого давления

енергоблока № 3 Ровенской АЭС (РАЭС) проведена оценка уровня накопленной циклической и статической повреждаемости. Установлено, что исчерпание длительной прочности стали, как механизм разрушения, имеет доминирующее влияние на ресурсные показатели исследуемого объекта, по сравнению с малоцикловою усталостью. Статическая составляющая накопленной повреждаемости ротора высокого давления турбины К-1000-60/3000 блока № 3 РАЭС $P_{ст}=77\%$, циклическая $P_{ц}=11\%$. Индивидуальный остаточный ресурс составляет 26287 часов, что позволяет продлить срок эксплуатации ротора высокого давления на дополнительные 25 тысяч часов.

Ключевые слова: атомная электростанция, продление эксплуатации, остаточный ресурс, паровая турбина, малоцикловая усталость, длительная прочность.