

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, В. А. ПЕШКО

ОЦЕНКА МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ, ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РОТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ Т-100/120-130 СТ. № 1 ПАО «ХАРЬКОВСКАЯ ТЭЦ-5»

АННОТАЦИЯ Развитие централизованного теплоснабжения в крупных городах требует проводить оценку индивидуального ресурса каждого теплофикационного энергоблока после достижения им паркового ресурса. Проведена оценка и прогнозирование остаточного ресурса на базе 3D-пространственных аналогов для ротора высокого давления паровой турбины Т-100/120-130 энергоблока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» с экспериментально полученными коэффициентами запаса прочности металла, а также с учетом реальных условий эксплуатации.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, ротор ВД, пуск из холодного состояния, из неостывшего состояния, из горячего состояния, остаточный ресурс, малоцикловая усталость, длительная прочность.

O. CHERNOUSENKO, V. PESHKO

ESTIMATING THE LOW-CYCLE FATIGUE, DAMAGEABILITY AND THE RESIDUAL LIFE OF THE ROTOR OF HIGH PRESSURE TURBINE T-100/120-130 UNIT NO 1 USED BY PJSC "KHARKIV CHPP-5"

ABSTRACT The development of centralized heat supply for large cities requires the estimation of the individual life of each cogeneration power unit that reached the economic life. To extend the service life of the cogeneration turbine T-100/120-130 unit No 1 used by PJSC "Kharkiv CHPP-5" we analyzed the individual service life using the integrated approach. This approach combines the data of destructive and nondestructive metal examination with the strength and longevity verification computations and the detailed studies of each individual history of the unit operation. Based on the 3D spatial analogue of high pressure rotor and numerical experiment data on the estimation of thermal and stress-strain behavior the damageability of basic metal has been calculated. In the course of the estimation of low-cycle fatigue of high pressure rotor the values of the reduced amplitude of the strain intensity for the most loaded rotor sections were established. When determining the permissible number of start cycles in different thermal states the metal safety factors were experimentally calculated. The computations done showed that a degree of the wear of basic metal makes up 69 %. The metal examination data analysis for the high pressure rotor over the entire operation period is indicative of its satisfactory condition and together with the computation data allows for the extension of the service life of high pressure rotor by 50000 hours and a number of the starts should not exceed 558 starts.

Key words: centralized heat supply, high pressure rotor, cold start, warm start, hot start, residual life, low-cycle fatigue and the long-term strength.

Введение

Продление срока эксплуатации отработавшего парковый ресурс энергетического оборудования является обыденной практикой в развитых странах. В США, Англии, Голландии, Польше, России и др. при расчетном ресурсе элементов оборудования ТЭС от 30 до 40 лет их предполагается эксплуатировать до наработки 50–80 лет. Продление срока службы оборудования может составлять менее 20–30 % стоимости строительства новой ТЭС, что позволяет считать продление ресурса весьма выгодным с экономической точки зрения. Согласно нормативным документам Министерства энергетики и угольной промышленности Украины парковый ресурс паровых турбин Т-100/120-130 ПАО «ТМЗ» равен 220 тыс. ч. при числе пусков 600 из различных тепловых состояний [1].

Для продления эксплуатации теплофикационных энергоблоков мощностью 100 МВт согласно нормативным документам [1, 2] необходимо

провести оценку индивидуального ресурса паровой турбины Т-100/120-130 блока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» на основе комплексного подхода. Данный подход сочетает в себе результаты разрушающего и неразрушающего контроля металла с поверочными расчетами на прочность и долговечность, а также детальное исследование индивидуальной истории эксплуатации каждого блока. На этапе контроля состояние металла, проработавшего длительный срок энергетического оборудования, отдельно необходимо исследовать возможности оптимального выбора коэффициентов запаса, что возможно при экспериментальном исследовании металла.

Цель работы

Выполнение оценки малоцикловой усталости паровой турбины Т-100/120-130 блока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5», с целью определения поврежденности основного металла и установки остаточной наработки, а также индивидуального ресурса ротора высокого давления.

Краткая характеристика энергоблока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5»

Блок, мощностью 100 МВт, с паровой турбиной Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» введен в эксплуатацию 20 декабря 1979 г. Нарботка блока № 1, по состоянию на 17.06.2016, составила 201150 часов, общее количество пусков – 802, из них пусков из холодного состояния было проведено 110, из неостывшего – 142, из горячего состояния – 550.

Одновальная паровая турбина типа Т-100/120-130-3 номинальной мощностью 110 МВт при 3000 об/мин с конденсацией и двумя отопительными отборами пара предназначена для непосредственного привода генератора переменного тока типа ТВФ-120-2 мощностью 120 МВт с водородным охлаждением. Турбина произведена на Уральском турбомоторном заводе [3]. Мощность в конденсационном режиме составляет 120 МВт, в теплофикационном режиме – 110 МВт. Максимальный расход пара равен 485 т/час.

Турбина рассчитана на работу с параметрами свежего пара $p_0 = 12,75$ МПа, $t_0 = 555$ °С, измеренными перед стопорным клапаном. Давление в конденсаторе составляет $p_k = 0,0057$ МПа. Номинальная температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_k = 20$ °С.

Ротор цилиндра высокого давления – цельнокованный, состоящий из одного двухвенечного колеса скорости и восьми дисков. Лопаточный аппарат ротора высокого давления выполнен левого вращения. Рабочие лопатки, для уменьшения потерь, имеют осевые уплотнения у корня и по бандажу, а также радиальные уплотнения по бандажу. К заднему концу ротора (передний подшипник) присоединяется вал насосной группы системы регулирования. Ротор ЦВД не имеет насадных втулок в концевых уплотнениях, неподвижные гребни уплотнений, расположенные в цилиндре, подходят к кольцевым канавкам и выступам, выточенным непосредственно к валу. Ротор высокого давления (РВД) изготовлен из хромомолибденованадиевой стали Р2МА (25Х1М1ФА) с первым критическим числом оборотов 1615 об/мин.

В период капитального ремонта летом 2016 года выполнялся визуальный контроль и магнитопорошковая дефектоскопия радиусных переходов литых корпусов ЦВД и ЦСД и регулирующих клапанов, неразрушающий контроль микроструктуры металла корпусных деталей, контроль роторов ВД и СД со стороны осевого канала и другие исследования. С целью оценки состояния металла ротора ВД проведено изучение и систематизация эксплуатационной и ремонтной документации по результатам контроля металла элементов энергооборудования, его повреждаемости, по ре-

зультатам исследования вырезов и поврежденных элементов за весь период эксплуатации.

Анализ результатов контроля металла РВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5»

Неразрушающий контроль проведен структурным отделением подразделением «Контроль и диагностика» ПАО «Киевэнерго», Централизованной службой по контролю металла (ЦСКМ) и Лабораторией металлов ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» в июле–августе 2016 года. Лабораторией металлов ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» произведен визуальный контроль ротора ВД (Акт № 607 от 28.07.2016 г.) – концевые части вала, свободные от уплотнений, ободы, гребни, полотнища с разгрузочными отверстиями, галтели и полотнища дисков и полумуфт, тепловые канавки. Поверхность элементов ротора ВД подвержена равномерной газовой коррозии и покрыта окалиной, плотно сцепленной с основным металлом. Признаков коррозионных язвин, следов эрозийного износа, следов задеваний и механических повреждений, следов электрической коррозии на поверхности элементов ротора ВД не выявлено.

Лабораторией металлов ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» произведена цветная дефектоскопия элементов ротора ВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 (Заключение № 671 от 01.08.2016 г.). Контролировались поверхности элементов ротора в доступных местах – ободы, гребни, разгрузочные отверстия, отверстия полумуфт, галтели дисков, тепловые канавки, входные и выходные кромки рабочих лопаток, бандажные отверстия. На наружной поверхности ротора ВД дефектов, превышающих допустимые НД нормы, не обнаружено.

Структурное отделенное подразделение «Контроль и диагностика» ПАО «Киевэнерго», Централизованная служба по контролю металла (ЦСКМ) сделало заключение, что при визуальном контроле осевого канала (заключение № VT-186-16 по визуальному контролю) трещин, расслоений металла, коррозии не обнаружено. При магнитопорошковом контроле (заключение № MT-87-17) на внутренней поверхности канала дефектов не обнаружено. При ультразвуковом контроле (заключение № UT-92-16) на поверхности канала в поперечном и продольном разрезе ротора ВД дефектов не обнаружено.

Проведен микроструктурный анализ подповерхностного слоя металла ротора ВД методом реплик и измерения твердости металла первой по ходу пара ступени и полумуфты в районе осевого канала ротора ВД. Микроструктура металла ротора соответствует требованиям [1] (протокол ЦСКМ от 12.08.2016 г. № 34785-34788).

По результатам проведенного технического аудита состояния металла ротора ВД, дефектов не

обнаружено, поэтому в процессе поверочного расчета при моделировании геометрии ротор ВД не вносились изменения в проектную конструкцию завода изготовителя.

Малоцикловая усталость, поврежденность и остаточный ресурс РВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1

Определяющий ресурсные характеристики энергетического оборудования уровень суммарных напряжений (температурных, от действия центробежных сил и давления пара) в роторе ВД при пусковых режимах имеет место в зоне первой регулирующей двухвечной ступени скорости, на ободе дисков в зоне хвостовиков лопаток, а также в зоне тепловых канавок передних концевых уплотнений роторов.

Амплитуда деформации согласно [4] определялась по значениям интенсивности деформаций в течение цикла нагружения (исходное состояние – нагружение – номинальный режим – разгружение – исходное состояние) с использованием выражения

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

где $\varepsilon_{i\max}, \varepsilon_{i\min}$ – максимальное и минимальное значение интенсивности деформаций в цикле.

Число циклов нагружения до появления трещин определялось по экспериментальным кривым малоцикловой усталости, полученных по испытаниям образцов на растяжение–сжатие при жестком симметричном цикле и постоянной температуре (ГОСТ 25.502-79). Допускаемое число циклов при расчетных температурах ниже 480 °С для жаропрочной стали, ниже 420 °С для легированной стали и ниже 350 °С для углеродистой стали принималось по экспериментальным кривым малоцикловой усталости меньшим из двух значений

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

где N_1, N_2 – числа циклов, соответствующие на кривой усталости амплитудам $\varepsilon_{a.пр.}$ и $n_\varepsilon \varepsilon_{a.пр.}$; n_N, n_ε – коэффициенты запаса прочности по числу циклов и деформации; $\varepsilon_{a.пр.}$ – приведенная к симметричному циклу нагружения амплитуда интенсивности деформаций с учетом эффективного коэффициента концентрации напряжений \bar{K}_T .

Приведенная к симметричному циклу нагружения, амплитуда интенсивности деформаций рассчитывалась по формуле

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

где ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости стали; C – коэффициент текущего числа циклов

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

σ_a – амплитуда интенсивности напряжений

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

σ_{-1} – предел усталости при симметричном цикле нагружения; σ_N – предел усталости при несимметричном цикле нагружения

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

σ_B – предел прочности стали на растяжение; r – коэффициент асимметрии цикла нагружения; \bar{K}_T – эффективный коэффициент концентрации напряжений

$$\bar{K}_T = 1 + p(K_T - 1); \quad (7)$$

p – коэффициент чувствительности стали к концентрации напряжений.

При повышенных температурах, когда проявляется ползучесть материала в номинальном режиме эксплуатации, допускаемое число циклов находилось так

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

где σ^c – интенсивность напряжений в рассматриваемой точке детали при состоянии установившейся ползучести; $\sigma_{д.п.}$ – предел длительной прочности материала для момента времени, определяемого заданным техническими условиями на турбину ресурсом; q – показатель степени в уравнении длительной прочности

$$t = B \cdot \sigma^q. \quad (9)$$

Приведенная к симметричному изотермическому циклу нагружения при расчетной температуре, амплитуда интенсивности деформаций рассчитывалась по формуле:

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

$$\sigma_N^c = \begin{cases} \min\left\{\frac{\sigma_a \sigma_{д.п.}(T_1)}{|\sigma_{\max}|}; \frac{\sigma_a \sigma_{д.п.}(T_2)}{|\sigma_{\max} - 2\sigma_a|}\right\}, & \text{при } \sigma_a < \bar{\sigma}_{0,2}^H, \\ \min\{\sigma_{д.п.}(T_1); \sigma_{д.п.}(T_2)\}, & \text{при } \sigma_a > \bar{\sigma}_{0,2}^H, \end{cases} \quad (11)$$

где $\sigma_{д.п.}(T_1), \sigma_{д.п.}(T_2)$ – пределы длительной прочности за срок службы соответствующей температуре T_1 и T_2 ; σ_{\max} – максимальное напряжение в цикле; $\bar{\sigma}_{0,2}^H$ – среднее значение циклического пре-

дела текучести материала приведенного к расчетным температурам T_1 и T_2 .

Суммарная поврежденность Π' , накопленная в металле ротора, работающего в условиях совместного действия ползучести при различных установившихся режимах q' типов и циклических нагрузок при различных переменных режимах k' типов определялась формуле

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

где $\Pi'_{ст}$, $\Pi'_{ц}$ – статическая и циклическая поврежденности, накопленные в проверяемой зоне ротора на момент оценки продления срока эксплуатации; t'_j – время работы на j -м установившемся режиме при температуре металла и эквивалентных местных напряжениях ползучести $(\sigma'_{sj})_{max}$; t'_{pj} – время до наступления предельного состояния под действием эквивалентных напряжений $(\sigma'_{sj})_{max}$ при температурах T'_j , определяемое с помощью диаграммы длительной прочности материала; n'_l – число циклов l -го типа; N'_{pl} – число циклов до появления усталостных трещин под воздействием только циклических нагрузок i -го типа; q' – число различных типов установившихся режимов на момент оценки с температурой T'_j и установившимися эквивалентными местными напряжениями ползучести $(\sigma'_{sj})_{max}$; k' – число различных типов циклов на момент оценки с различными размахами приведенных напряжений $\Delta\sigma'_l$ или амплитуд деформаций ε'_{dl} .

Штрихом отмечены все величины, относящиеся к предшествующему до анализа периоду эксплуатации.

Если по данным, представленным электростанцией, невозможно установить типы проведенных пусков, а известно только их общее число n за время до момента оценки накопленной поврежденности, то накопленная циклическая поврежденность $\Pi'_{ц}$ определялась в запас по упрощенной формуле

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

где N_p – число циклов до появления трещин малоциклового усталости (МЦУ), соответствующее наиболее жесткому режиму (режиму с максимальной амплитудой деформаций ε_d в рассматриваемой зоне).

Остаточная наработка до появления трещины $[\tau]_{ост}$ (в годах) определялась формулой

$$[\tau]_{ост} = \frac{1 - \Pi'}{\Pi''_r}, \quad (14)$$

где Π''_r – прогнозируемая на последующий за оценкой период эксплуатации осредненная годовая поврежденность, которая будет накапливаться в рассматриваемой зоне ротора или корпуса при чередовании q'' типов установившихся режимов и k'' типов циклов с различными циклическими. Двумя штрихами отмечены все величины, относящиеся к периоду эксплуатации после проведения оценки и продления ресурса.

При расчетах на малоциклового усталость в роторе ВД по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния исследовались следующие узлы: 1 – хвостовые крепления первого венца регулирующей ступени; 2 – осевое отверстие ротора ВД в зоне регулирующей ступени (РС); 3 – галтель перед регулирующей ступенью со стороны передних концевых уплотнений; 4 – галтель диска № 1 со стороны первой нерегулируемой ступени; 5 – последнее уплотнение первой обоймы передних концевых уплотнений (ПКУ); 6 – коробка уплотнений в зоне присоса воздуха. Эти узлы показаны на рис. 1.

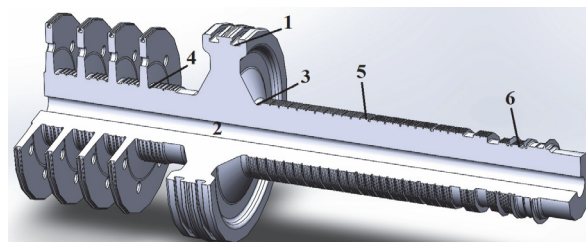


Рис. 1 – Характерные узлы ротора ВД при исследовании на малоциклового усталость

В исследуемых узлах рассчитывались интенсивности условных упругих напряжений, а также главные напряжения в течение всего времени для всех типов пусков. Строились графики размахов интенсивности условных упругих напряжений, по оси ординат откладывались интенсивности напряжений, а по оси абсцисс – время пуска из различных тепловых состояний (рис. 2–4).

По графикам определялись временные точки, где размах интенсивности условных упругих напряжений был максимальным, которые использовались для определения поврежденности от малоциклового усталости и остаточного ресурса ротора ВД (табл. 1–3).

В расчетах на малоциклового усталость запас по числу циклов и по деформациям принимается в соответствии с рекомендациями РТМ [4] $n_N = 5$, $n_\varepsilon = 1,5$. По экспериментальным кривым малоциклового усталости стали Р2МА (25Х1М1ФА) получено допустимое число циклов до образования трещины N_d . Расчеты проведены для пусковых режимов из горячего, неостывшего и холодного состояний (табл. 4).

С учетом оценки малоциклового усталости металла РВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» (табл. 4) расчетная оценка поврежденности, остаточной допускаемой наработки в годах и индивидуального ресурса ротора ВД согласно рекомендациям РТМ и РД [4, 5] для энергоблока ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» представлена в табл. 5.

Если по данным, представленным электрической станцией, невозможно точно установить количество различных типов пусков ввиду отсутствия статистики по пускам, а достоверно известно только их общее число $n_{общ}$ за время эксплуата-

ции, то циклическая поврежденность определяется в запас по упрощенной формуле согласно рекомендациям [4, 5]. При этом в формуле принимается число циклов до появления трещин $[N_{min}]$, которое соответствует наиболее жесткому режиму пуска с максимальной амплитудой интенсивности деформаций в рассматриваемой зоне. Полученная расчетная оценка повреждаемости, остаточной наработки в годах и индивидуального ресурса по упрощенной формуле может рассматриваться как максимально низкий прогноз индивидуального ресурса для элементов паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 (табл. 5, пункты 14–16).

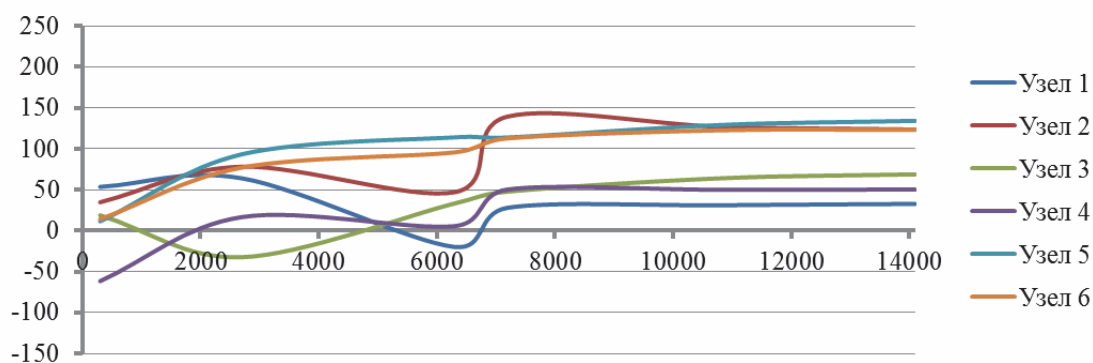


Рис. 2 – Размахи интенсивности условных упругих напряжений при пуске из ГС

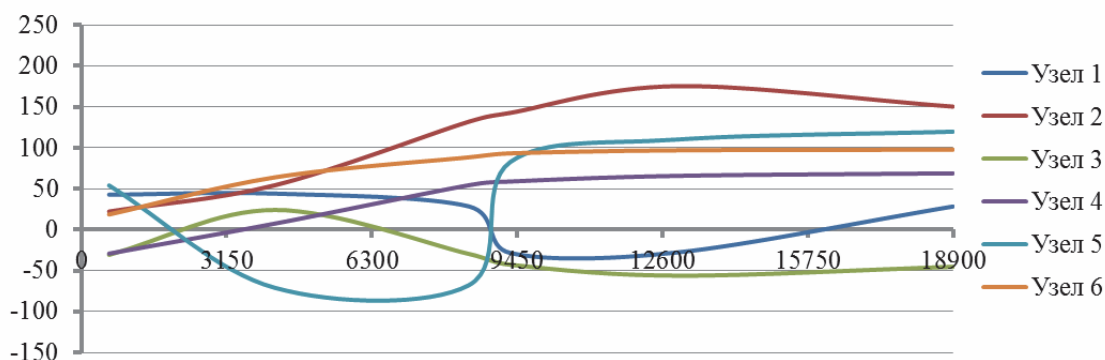


Рис. 3 – Размахи интенсивности условных упругих напряжений при пуске из НС

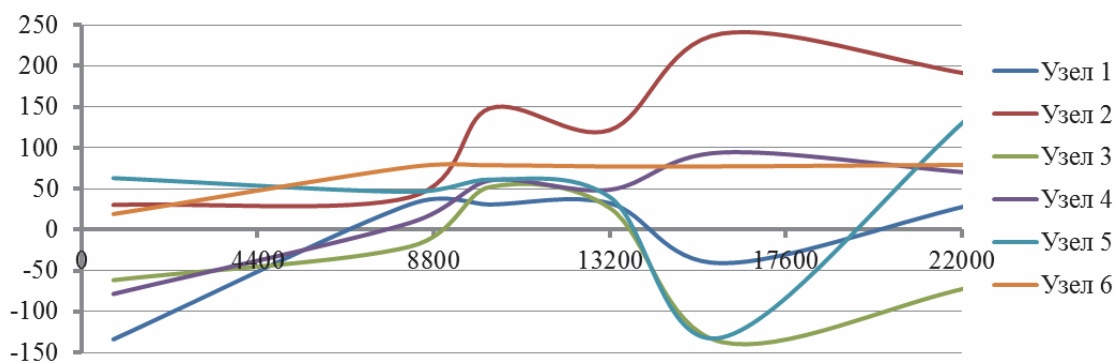


Рис. 4 – Размахи интенсивности условных упругих напряжений при пуске из ХС

Таблица 1 – Расчётная оценка малоциклового усталости металла РВД при пуске из ГС

Номер узла	σ_a , МПа	$t_{\text{НОМ}}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a. \text{пр.}}$, %
1	41,95	511	179,0	-0,309	549	411,8	294,9	0,0757
2	87,15	500	180,0	-0,250	551	413,3	284,9	0,1022
3	50,60	506	179,6	-0,469	550	412,5	324,5	0,0659
4	56,00	493	181,0	-1,000	552	414,0	414,0	0,0264
5	72,90	436	186,0	-0,086	558	418,5	256,5	0,1078
6	68,70	34	214,0	-0,114	646	484,5	303,6	0,0996

Таблица 2 – Расчётная оценка малоциклового усталости металла РВД при пуске из НС

Номер узла	σ_a , МПа	$t_{\text{НОМ}}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a. \text{пр.}}$, %
1	36,20	511	179,0	-0,642	549	411,8	353,80	0,0449
2	98,85	500	180,0	-0,127	551	413,3	261,42	0,1188
3	40,15	506	179,6	-1,000	550	412,5	412,50	0,0191
4	49,00	493	181,0	-0,422	552	414,0	317,34	0,0687
5	95,40	436	186,0	-0,593	558	418,5	351,14	0,0747
6	58,25	34	214,0	-0,191	646	484,5	321,03	0,0884

Таблица 3 – Расчётная оценка малоциклового усталости металла РВД при пуске из ХС

Номер узла	σ_a , МПа	$t_{\text{НОМ}}$, °С	E , ГПа	r	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	σ_N , МПа	$\varepsilon_{a. \text{пр.}}$, %
1	83,15	511	179,0	-1	549	411,8	411,75	0,0396
2	135,00	500	180,0	-0,126	551	413,3	261,28	0,1361
3	94,70	506	179,6	-1	550	412,5	412,50	0,0450
4	86,40	493	181,0	-0,831	552	414,0	387,12	0,0534
5	135,35	436	186,0	-0,948	558	418,5	410,20	0,0659
6	49,25	34	214,0	-0,242	646	484,5	332,39	0,0803

Таблица 4 – Расчётная оценка малоциклового усталости металла РВД турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5»

Тип пуска турбины	Температура по толщине ротора t_{max} , °С	Интенсивность напряжений, σ_i , МПа	Приведенная деформация, $\varepsilon_{a. \text{пр.}}$, %	Допустимое число пусков, N_d
				$n_N = 5, n_\varepsilon = 1,5$
ГС	500	210,1	0,10216	3040
НС	500	178,2	0,11884	1840
ХС	500	250,1	0,13605	1360

Реальные значения повреждаемости могут иметь тенденцию к снижению по следующим причинам: остановки с принудительным расхолаживанием могут увеличивать амплитуду напряжений; при наработке оборудования более 200 тыс. часов имеет место некоторая деградация свойств металла; отклонение реальных пусковых графиков от графиков, определенных инструкцией по эксплуатации, за счет влияния человеческого фактора; отсутствие полных данных о реальном состоянии металла роторов в данный момент эксплуатации.

Таким образом, расчетный ресурс металла ротора ВД турбоагрегата Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» выработан на 69 %. Циклическая поврежденность, определяемая в за-

пас по упрощенной формуле согласно рекомендациям [5], составляет для РВД 59 %. Допустимое дополнительное расчетное число пусков для РВД составит порядка 558 пусков в самом консервативном варианте, когда в расчете использовано минимально допустимое число пусков 1360 при пуске из холодного состояния (п. 5, табл. 5).

Индивидуальный остаточный ресурс составляет для РВД 92162 часа, а с учетом упрощенной формулы в запас 21977 ч. в самом консервативном случае, как максимально низкий прогноз. Анализ полученных результатов позволяет продлить эксплуатацию роторов ВД на 50000 ч. при числе пусков, не превышающем 558 циклов.

Таблица 5 – Расчётная оценка поврежденности, остаточной наработки в годах и индивидуального ресурса ротора ВД турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5»

№	Наименование	Формула	Значение
1	Температура металла	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	508
2	Интенсивность напряжений	$\sigma_{i\max}, \text{ МПа}$	102,8
3	Предел текучести	$\sigma_{02}^B, \text{ МПа}$	551
4	Запас прочности по $\sigma_{i\max}$	$n'_t = \sigma_{02}^B / \sigma_{i\max}$	5,36
5	Допускаемое число циклов по различным типам пусков	$[N_{pl}]n_{\text{НС}}^{\text{РВД}} = 142$	1840
		$[N_{pl}]n_{\text{ХС}}^{\text{РВД}} = 110$	1360
		$[N_{pl}]n_{\text{ГС}}^{\text{РВД}} = 550$	3040
6	Циклическая поврежденность	$[\Pi_{\text{ц}}] = \sum n_i / [N_{pl}]$	0,339
7	Статическая поврежденность	$[\Pi_{\text{ст}}] = \sum t_i / [t_{p1}]$	0,347
8	Суммарная поврежденность	$[\Pi_{\text{сум}}] = [\Pi_{\text{ц}}] + [\Pi_{\text{ст}}]$	0,686
9	Наработка, час	$T, \text{ ч.}$	201150
10	Среднее число часов работы в год	$T_{\text{год}} = T/z$	5436,5
11	Остаточная наработка в годах	$G = 1 - [\Pi] / [\Pi'_t], \text{ лет}$	17
12	Индивидуальный остаточный ресурс	$T_{\text{общ}} = G \times \tau_{\text{год}}, \text{ год}$	92162
13	Общее число пусков	$N_{\text{общ}}$	802
14	Циклическая поврежденность (упрощенная формула)	$[\Pi_{\text{ц}}]_{\text{упрощ.}} = \sum n_{\text{зар}} / [N_{\text{min}}]$	0,59
15	Суммарная поврежденность (упрощенная формула)	$[\Pi_{\text{сум}}]_{\text{упрощ.}} = [\Pi_{\text{ц}}]_{\text{упрощ.}} + [\Pi_{\text{ст}}]$	0,937
16	Индивидуальный остаточный ресурс (упрощенная формула)	$T'_{\text{ост}} = G \times \tau_{\text{год}}, \text{ ч.}$	21977

Выводы

1 Расчеты на малоцикловую усталость РВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» показали, что расчетная степень выработки ресурса металла ротора ВД составляет порядка 34 %. Допустимое дополнительное расчетное число пусков для РВД составит порядка 558 пусков.

2 Расчеты на статическую прочность РВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» показали, что расчетная степень выработки ресурса металла ротора ВД составляет порядка 35 %.

3 Суммарная поврежденность металла ротора высокого давления составляет 69 % и допускает дальнейшую эксплуатацию на ограниченный срок.

4 Индивидуальный остаточный ресурс РВД составляет 92162 часа, а с учетом упрощенной формулы в запас 21977 часов, как максимально низкий прогноз индивидуального ресурса.

5 Анализ результатов контроля металла ротора ВД за весь период эксплуатации свидетельствует о его удовлетворительном состоянии и совместно с результатами произведенных расчетов должны быть учтены при составлении решения

экспертно-технической комиссии о продлении срока эксплуатации элементов турбины.

6 Анализ полученных результатов позволяет продлить эксплуатацию РВД на 50000 часов при числе пусков, не превышающем 558 пусков.

Список литературы

- 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. – Київ : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
- 2 СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-52:2011 Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбіни : методичні вказівки / Міненерговугілля України / **Н. Г. Шульженко**. – Офіц. вид., 2011. – 24 с.
- 3 Инструкция по эксплуатации паровой турбины Т-100/120-130 бл. 1, 2 / ПАО "Харьковская ТЭЦ-5". – с. Подгорки, 2016. – 94 с.
- 4 РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость. – Москва, 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 экс-

платування сверх паркового ресурса. – Москва, 1996. – 98 с.

Bibliography (transliterated)

- (2005), *ND MPE Ukrainy*. *Kontrol' metalu i prodovzhennya terminu ekspluatatsiyi osnovny'x elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovy'x elektrostancij*. – *Ty'pova instrukciya. SOU-N MPE 40.17.401:2004 [RD of MFEU. Metal inspection and extending operating life of main components of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2004]*, GRIFRE, Ministry of fuel and energy of Ukraine, Kiev, Ukraine.
- Shulzhenko, N. G.** (2011), SOU-N MEV 40.1-21677681-52:2011 *Vy'znachennya rozrakhunkovogo resursu ta ocinky' zhy'vuchosti rotoriv ta korpusny'x detalej turbiny*: *Metody'chni vказivky' / Minenergovugillya Ukrainy* [Determination of the estimated
- (2016), *Instruktsiya po ekspluatatsii parovoy turbiny T-100/120-130 bl. 1, 2 [Exploitation instruction steam turbine type T-100/120-130 of 1st and 2nd unit]*, Podgorki, Ukraine.
- (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovyh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuyu ustalost'* [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation], Moscow, Russian.
- (1996), RD 34.17.440–96. *Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedeniya rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovyh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatatsii sverh parkovogo resursa [Methodological guidelines to perform works within assessment of individual service life of steam turbines and its extension beyond the fleet service life]*, Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Черноусенко Ольга Юрьевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Теплоэнергетических установок Тепловых и Атомных Электростанций, Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев; 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 "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants; Kyiv, Ukraine.

Пешко Виталий Анатольевич – аспирант кафедры Теплоэнергетических установок Тепловых и Атомных Электростанций, Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID 0000-0003-0610-1403.

Peshko Vitaliy Anatoliyovych – Postgraduate Student at the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Черноусенко, О. Ю. Оценка малоциклового усталости, поврежденности и остаточного ресурса ротора высокого давления турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» / **О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 30–37. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.04.

Please cite this article as:

Chernousenko, O. and Peshko, V. (2017), "Estimating the Low-Cycle Fatigue, Damageability and the Residual Life of the Rotor of High Pressure Turbine T-100/120-130 unit No 1 used by PJSC "Kharkiv CHPP-5", *Bulletin of NTU "KhPI"*. *Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 30–37, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.04.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Черноусенко, О. Ю. Оцінка малоциклової втомлюваності, пошкоджуваності та залишкового ресурсу ротору високого тиску турбіни Т-100/120-130 ст. № 1 ПАТ «Харківська ТЕЦ-5» / **О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 10(1232). – С. 30–37. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.04.

АНОТАЦІЯ Розвиток централізованого теплопостачання у великих містах вимагає проведення оцінки індивідуального ресурсу кожного теплофікаційного енергоблоку після досягнення ним паркового ресурсу. Проведено оцінку і прогнозування залишкового ресурсу на базі 3D-просторових аналогів для ротору високого тиску парової турбіни Т-100/120-130 енергоблоку № 1 ПАТ «Харківська ТЕЦ-5» з експериментально отриманими коефіцієнтами запасу міцності металу, а також з урахуванням реальних умов експлуатації.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, ротор ВТ, пуск з холодного стану, з неостиглого стану, з гарячого стану, залишковий ресурс, малоциклова втомлюваність, довготривала міцність.

Поступила (received) 01.02.2017