

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

ПОВТОРНОЕ ПРОДЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИТОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ КУРАХОВСКОЙ ТЭС

Энергоблоки ДТЭК «Кураховская ТЭС» мощностью 200 МВт с паровыми турбинами К-200-130 после достижения ими паркового ресурса на сегодняшний день требуют принятия решения о дальнейшей эксплуатации. Проведена оценка остаточного ресурса на базе 3D-пространственных аналогов для корпусов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-200-130 мощностью 200 МВт блоков № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» с экспериментально полученными коэффициентами запаса прочности металла с учетом реальных условий эксплуатации согласно станционных данных поврежденности. Рассмотрены рекомендации по повторному продлению срока эксплуатации высокотемпературного энергетического оборудования.

Ключевые слова: корпус СД, корпус ВД, пуск из холодного состояния, из неостывшего состояния, из горячего состояния, остаточный ресурс, малоцикловая усталость, длительная прочность.

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

ПОВТОРНЕ ПРОДОВЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛИТОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОБЛОКІВ КУРАХІВСЬКОЇ ТЕС

Енергоблоки ДТЕК «Курахівська ТЕС» потужністю 200 МВт з паровими турбінами К-200-130 після досягнення ними паркового ресурсу на сьогоднішній день потребують прийняття рішення щодо подальшої експлуатації. Проведено оцінку залишкового ресурсу на базі 3D-просторових аналогів для корпусів ЦВД і ЦСТ парової турбіни К-200-130 потужністю 200 МВт блоків № 4, 5 ДТЕК «Курахівська ТЕС» з експериментально отриманими коефіцієнтами запасу міцності металу з врахуванням реальних умов експлуатації відповідно до станційних даних пошкоджуваності. Розглянуто рекомендації щодо повторного продовження строку експлуатації високотемпературного енергетичного обладнання.

Ключові слова: корпус СТ, корпус ВТ, пуск з холодного стану, з горячого стану, з неостиглого стану, залишковий ресурс, малоциклова втома, довготривала міцність.

O. CHERNOUSENKO, D. RINDYUK, V. PESHKO

REFRESHING EXTENSION OF THE SERVICE LIFE OF CAST HIGH TEMPERATURE EQUIPMENT FOR THE POWER-GENERATING UNITS AT KURAKHOVSKA HEAT POWER PLANT

The power-generating units at Kurakhovska Heat Power Plant have already worked off their fleet life. Since cast high-temperature casings are one of the most expensive elements of the steam turbine an issue of the possibility of refreshing extension of their service life remains to be a problem of strategic importance. This scientific paper gives the computation data of thermal and elastically deformed states of the casings of high-pressure cylinders (HPC) and average-pressure cylinders (APC) for the turbine K-200-130-3 during the main operation modes. To do the computations we used the state-of-the-art methods of mathematical simulation. The availability of service-induced damages in the design structure and the results of repair and restoration changes were taken into account. An estimation of the low-cycle fatigue and durable strength done in compliance with current normative documents is indicative of the exhaust of life indices of the basic metal of casing elements. However, previous investigations of the physical and mechanical structure of metal with the exhausted fleet life allow us to use lower coefficients of the margin of safety. The service life of the casings of HPC and APC of the power-generating unit No4 at Kurakhovska Heat Power Plant can be extended by 50 thousand hours and that of the power-generating unit No 5 by 45 thousand hours after the expert commission adopts the coefficients of the margin of safety at the level of 3 for the number of cycles and at the level of 1.25 for the strain.

Key words: Average pressure casing, high-pressure casing, cold start-up, warm start-up, hot start-up, residual life, low-cycle fatigue and long-term strength.

Введение

Согласно нормативным документам Министерства энергетики и угольной промышленности Украины парковый ресурс паровых турбин К-200-130 ЛМЗ равен 220 тыс. ч. при числе пусков 800 [1]. В 2006–2007 гг. НТУУ КПИ им. Игрия Сикорского были выполнены работы по оценке остаточного ресурса высокотемпературного литого энергетического оборудования паровой турбины К-200-130 мощностью 200 МВт блоков № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» и продлена его эксплуатация на 50 тыс. ч.

На сегодняшний день сроки продления эксплуатации энергоблоков № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» истекли согласно нормативным доку-

ментам [1–2]. Возникла необходимость провести оценку остаточного ресурса паровой турбины К-200-130 мощностью 200 МВт блоков № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» для повторного продления эксплуатации высокотемпературного литого энергетического оборудования.

Цель работы

Выполнение оценки напряженно-деформированного состояния литых корпусных элементов турбины К-200-130 с учетом результатов ремонтно-восстановительных работ. Оценка длительной прочности и малоциклового поврежденности основного металла для установления возможности повторного продления эксплуатации корпусных

© О. Ю. Черноусенко, Д. В. Рындюк, В. А. Пешко, 2018

элементов турбин № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС».

Анализ результатов контроля металла корпусов ВД и СД турбин № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС»

Неразрушающий контроль был выполнен Службой металлов и сварки предприятия «Донбассэнергоналадка», а также Лабораторией металлов и сварки ДТЭК «Кураховская ТЭС» в 2008 и 2016 годах.

При визуальном контроле и магнитопорошковой дефектоскопии (МПД) ЦВД блока № 4 ДТЭК «Кураховская ТЭС» в 2008 г. (нижняя половина – Заключение № 258-08 от 22.07.2008 г.) в канале паровпуска со стороны блока № 3 обнаружена зона растрескивания 100х270 мм. Зона повреждения представляет собой сеть мелких, продольно ориентированных трещин длиной до 25 мм ниже наплавленного металла ранее выполненной выборки. В доступных местах произведена выборка зон растрескивания абразивным инструментом.

Вдоль второго посадочного паза под диафрагменную обойму обнаружены две трещины без выхода на разъем $L_4 = 240$ мм, $L_5 = 200$ мм. Глубина выборок до 12 мм, Трещины выбраны и заварены электродами ЦТ-28 по технологии ЛМЗ.

В ЦВД блока № 4 ДТЭК «Кураховская ТЭС» в 2008 г. (верхняя половина – Заключение № 258-08 от 22.07.2008 г.) с обеих сторон канала паровпуска обнаружены зоны растрескивания аналогичные зонам на нижней половине ЦВД размерами 150х200 мм. Вдоль второго посадочного паза пол диафрагменную обойму обнаружены две трещины без выхода на разъем $L_1 = 220$ мм и $L_2 = 180$ мм. Трещины выбраны абразивным способом. Все выборки, выполненные на внутренней поверхности ЦВД, заварены электродами ЦТ-28 по технологии ЛМЗ. После ремонта дефектов не обнаружено. На радиусных переходах наружной поверхности дефектов не обнаружено.

В ЦСД блока № 4 ДТЭК «Кураховская ТЭС» в 2008 г. (нижняя половина – Заключение № 258-08 от 22.07.2008 г.) по обе стороны паровпуска в районе зон растрескивания, которые были выбраны в предыдущий капитальный ремонт, обнаружены две трещины: $L_1 = 40$ мм, $L_2 = 55$ мм. Обнаруженные трещины выбраны абразивами.

При визуальном контроле и магнитопорошковой диагностике блока № 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» в трещины на корпусах ЦВД и ЦСД обнаруживали при всех контролях. Некоторые трещины на корпусе ЦВД имели выход на фланцевый разъем. По результатам последнего неразрушающего контроля состояния металла корпуса ЦВД и ЦСД (Заключение № 439-16 от 22.09.2016 г.) обнаружены трещины длиной от 20–60 мм до 1400–1800 мм в корпусе ЦВД. Трещины выбраны абразивным инструментом и заварены.

По результатам Заключения экспертизы № 34063592-09-ИЭС-47-16, выполненной ООО «Интерэнергосервис», состояние металла элементов ЦВД и ЦСД удовлетворительное с учетом проведенного ремонта.

По результатам проведенного технического аудита состояния металла высокотемпературных элементов ЦВД и ЦСД все обнаруженные дефекты в процессе поверочного расчета при моделировании геометрии корпусов ЦВД, ЦСД вносились в проектную конструкцию завода изготовителя.

Тепловое, напряженно-деформированное состояние, малоцикловая усталость, статическая поврежденность и остаточный ресурс литых корпусных элементов турбины

Моделирование теплового и напряженно-деформированного состояний литых высокотемпературных элементов паровой турбины К-200-130 блоков № 4, 5 ДТЭК «Кураховская ТЭС» на стационарных и пусковых режимах работы осуществлялось в трехмерной постановке согласно нормативным документам [3–4]. Для анализа напряженно-деформированного состояния рассмотрены три режима: пуск из холодного состояния по типу ХС ($t_{0мет} = 100$ °С), из неостывшего состояния НС-1 ($t_{0мет} = 240$ °С) и из неостывшего состояния НС-2 ($t_{0мет} = 410$ °С).

При геометрическом моделировании высокотемпературных литых элементов паровой турбины К-200-130 учитывалось, что конструктивно корпуса представляют сложные технические объекты с развитой системой патрубков подвода и отвода пара. Существенное влияние на тепловое и напряженно-деформированное состояние корпусов оказывают массивные фланцы горизонтального разъема, прогрев которых осложнен. Для улучшения пусковых режимов применяется обогрев фланцев путем подачи пара в обнизки фланцев. Все конструктивные особенности корпусов ЦВД и ЦСД вызывают необходимость моделирования этих объектов в трехмерной постановке.

Расчетная оценка теплового и напряженно-деформированного состояния корпусов ЦВД, ЦСД турбины К-200-130-3 ст. № 4 проводилась с учетом повреждаемости корпусов путем организации выборок металла в местах образования трещин.

При пусках из неостывшего состояния НС-2 для ЦВД блока № 4 максимальная величина интенсивности условных упругих напряжений от совместного действия разности температуры и действия давления пара в ЦВД отмечена в торообразной части корпуса в зоне растрескивания, где осуществляется переход от стенки корпуса к патрубкам подвода пара. Величина их составляет $\sigma_{imax} = 416,2$ МПа, при этом значения температур металла в этих точках не превышают 401 °С.

При пусках из холодного состояния ХС (рис. 1) высокие значения градиента температур возни-

кают в ЦВД по всем контрольным узлам в начальные этапы пуска (выдержка при 1200 об/мин – 2100 с). Максимальная величина интенсивности условных упругих напряжений от совместного действия разности температуры и действия давления пара в ЦВД отмечена в торообразной части корпуса в зоне растрескивания, где осуществляется переход от стенки корпуса к патрубкам подвода пара. Величина их составляет $\sigma_{i\max} = 473,2$ МПа, при этом значения температур металла в этих точках не превышают 294 °С (рис. 1).

При пусках из неостывшего состояния НС-2 для ЦСД блока № 4 максимальный градиент температур имеет место при нагружении от 30 до 210 МВт (2800 с). При пусках из холодного состояния ХС максимальный градиент температур имеет место при выдержке на холостом ходу при 3000 об/мин (2700 с) и при нагружении до 30 МВт в момент времени 12600 с (рис. 2а). Максимальное значение интенсивности условных упругих напряжений $\sigma_{i\max} = 372,9$ МПа корпуса ЦСД находится на внутренней поверхности корпуса в зоне паровпускной части при пусках из НС-2 при нагружении от 30 МВт до 210 МВт (2800 с) и $\sigma_{i\max} = 493,3$ МПа при пусках из ХС при нагружении до 30 МВт в момент времени 12600 с (рис. 2б).

Амплитуда деформации согласно [5] определялась по значениям интенсивности деформаций в течение цикла нагружения (исходное состояние – нагружение – номинальный режим – разгрузка – исходное состояние). Число циклов нагружения до появления трещин определялось по экспериментальным кривым малоциклового усталости, полученным в результате испытаний образцов на растяжение – сжатие при жестком симметричном цикле и постоянной температуре.

Суммарная поврежденность Π' , накопленная в металле роторов, работающих в условиях совместного действия ползучести при различных

установившихся режимах и циклических нагрузок при различных переменных режимах, и остаточная наработка до появления трещины (в годах) определялась согласно [6].

При расчетах на малоцикловую усталость в ЦСД блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС по результатам расчетов напряженно-деформированного состояния исследовались контрольные точки (рис. 3). В исследуемых узлах рассчитывались интенсивности условных упругих напряжений, главные напряжения в течение всего времени пуска 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. Для ЦСД блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС размахи интенсивности условных упругих напряжений для пусковых режимов типа ХС максимальны в момент пуска 3600 с и 13500 с (рис. 3). Аналогичные данные рассчитаны и для других пусковых режимов.

В отношении корпуса ЦВД блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС стоит отметить, что размахи интенсивности условных упругих напряжений для пускового режима из НС-2 максимальны в момент пуска 3000 с (рис. 4).

В расчетах на малоцикловую усталость, в соответствии с рекомендациями [5], запас по числу циклов принимается на уровне $n_N = 5$ и по деформациям – $n_\epsilon = 1,5$, которые позволяют получить допустимое число циклов до образования трещины N_d . Во втором случае эти же коэффициенты приняты на уровне $n_N = 3$ и $n_\epsilon = 1,25$. Такие значения получены в результате экспериментальных исследований структуры и свойств металла с целью уточнения характеристик длительной прочности и запасов прочности [7].

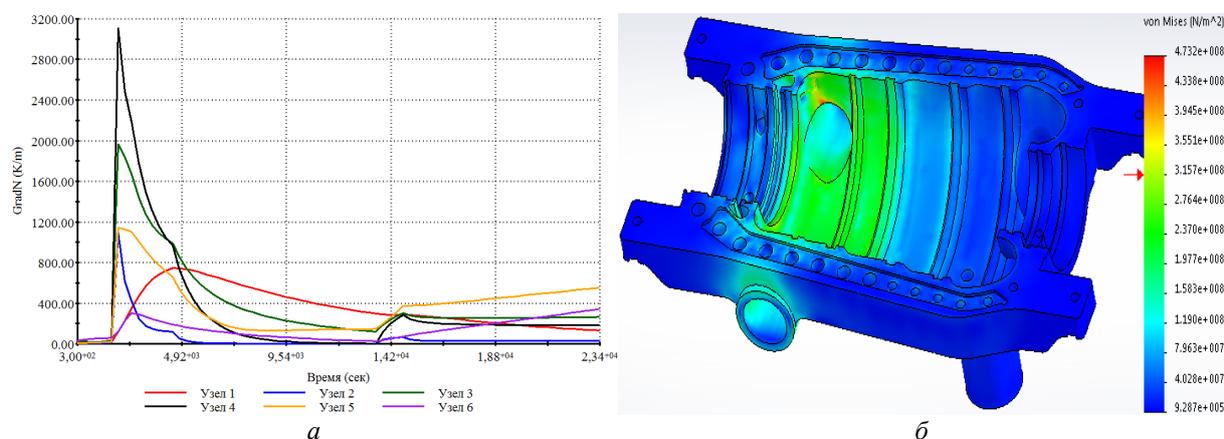


Рис. 1 – Результаты оценки НДС корпуса ЦВД при пуске из холодного состояния: а – градиенты температур (1 – вторая камера передних концевых уплотнения; 2 – расточка крепления первой обоймы передних концевых уплотнений, 3 – область над паровпускком; 4 – область под паровпускком; 5 – расточка под вторую обойму диафрагм сопловых лопаток; 6 – первая камера задних концевых уплотнений); б – НДС в момент времени 2100 с (выдержка при 1200 об/мин)

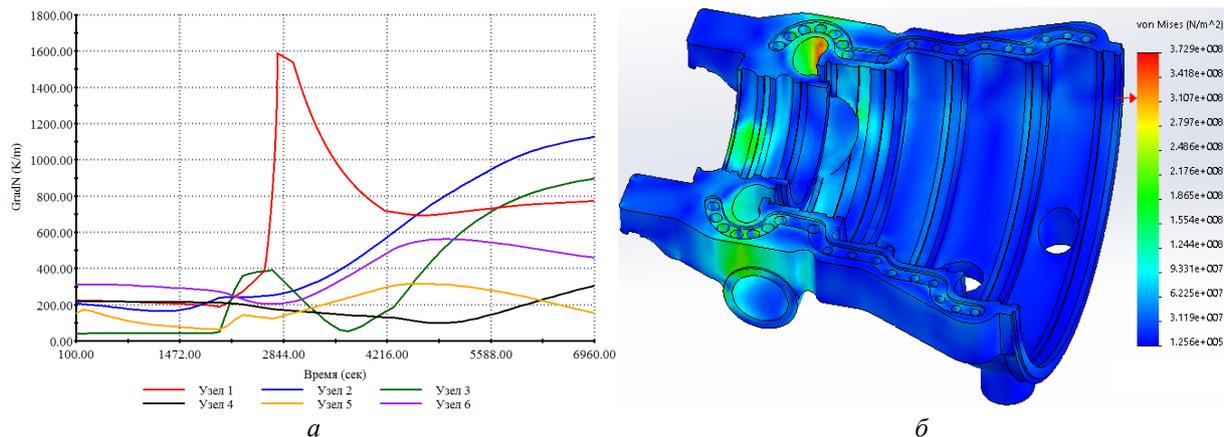


Рис. 2 – Результаты оценки НДС корпуса ЦСД при пуске из неостывшего состояния НС-2:
 а – градиенты температур (1 – область паровпуска; 2 – область между второй и третьей группой шпилек; 3 – крепление второй обоймы диафрагм ступеней давления; 4 – область прилегания патрубка пятого отбора; 5 – вторая камера передних концевых уплотнений; 6 – первая камера передних концевых уплотнений); б – НДС в момент времени 2800 с (нагружение до 210 МВт)

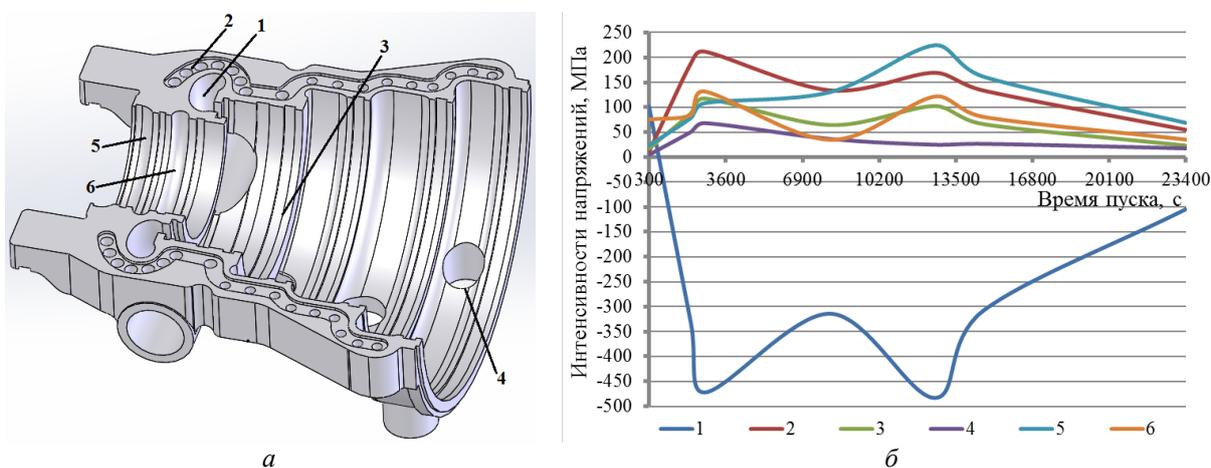


Рис. 3 – ЦСД турбины К-200-130-3 блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС при пуске из ХС:
 а – контрольные области; б – размахи интенсивности условных упругих напряжений

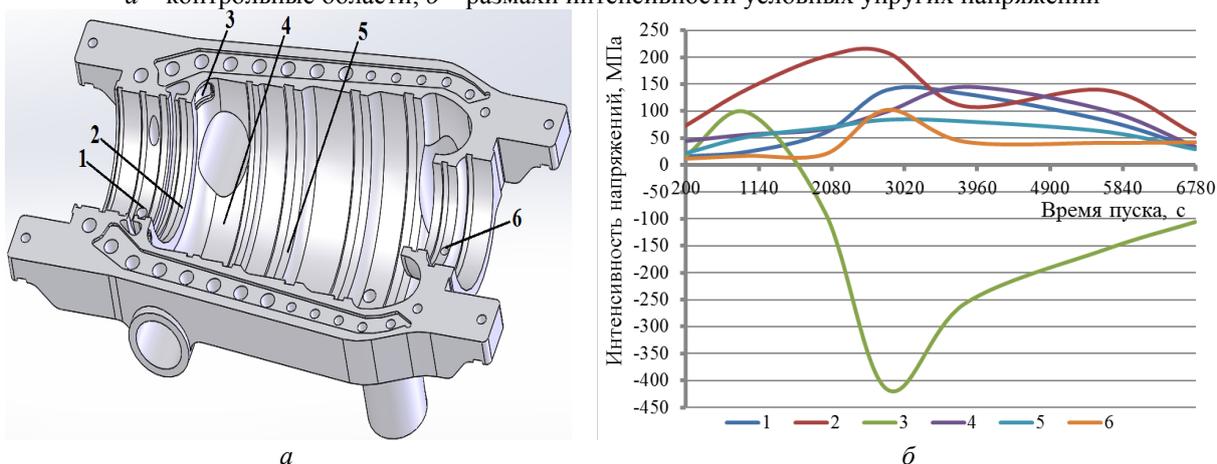


Рис. 4 – ЦВД турбины К-200-130-3 блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС при пуске из ГС:
 а – контрольные области; б – размахи интенсивности условных упругих напряжений

На основании действующих силовых нагрузок от внутреннего давления и теплового состояния металла корпусов по максимальным и минимальным значениям интенсивностей условно-

упругих напряжений для рассмотренных режимов турбоустановки выполнен поверочный расчет корпусов на малоцикловую усталость, статическую поврежденность и остаточный ресурс.

Результаты расчетной оценки малоциклового усталостной прочности металла с учетом повреждаемости корпусов ЦВД и ЦСД путем организации выборок металла в местах образования трещин представлены в табл. 1–2.

НТУУ «КПИ» совместно с ИПП НАНУ по заказу «Востокэнерго» в 2008 г. были проведены экспериментальные исследования по влиянию старения на изменение физико-механических свойств конструкционных легированных сталей при эксплуатационных температурах с целью уточнения запасов прочности металла ЦВД и ЦСД [8]. Анализ реального состояния стали 15Х1М1ФЛ показал, что деградация ее свойств по числу циклов (до

35 %) не превышает допустимой [40 %] во всем исследованном диапазоне амплитуд деформаций (от 0,157 до 1,802 %). По деформациям допустимый предел снижения циклической прочности [17 %] имеет место в диапазоне амплитуд деформации от 0,0 до 0,352 %. Следовательно, в указанном диапазоне амплитуд напряжений коэффициенты запаса прочности могут быть установлены на уровне $n_N = 3$ и $n_e = 1,25$.

Тогда уточненное с учетом нормативных коэффициентов запаса допускаемое минимальное число циклов до разрушения составляет 3700 пусков для корпуса ЦВД (табл. 1) и 2900 пусков для корпуса ЦСД (табл. 2).

Таблица 1 – Расчетная оценка малоциклового усталости металла ЦВД турбины К-200-130-3 блока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС

Тип пуска турбины	Температура металла в исследованной области t_{\max} , °С	Максимальная интенсивность напряжений, σ_i , МПа	Приведенная деформация, $\varepsilon_{a\text{ пр}}$, %	Допустимое число пусков, N_d	
				$n_N = 5$, $n_e = 1,5$	$n_N = 3$, $n_e = 1,25$
НС-2	509	416	0,12325	4600	7670
НС-1	509	412	0,12848	4000	6670
ХС	509	473	0,1323	3700	6170

Таблица 2 – Расчетная оценка малоциклового усталости металла ЦСД турбины К-200-130-3 блока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС

Тип пуска турбины	Температура металла в исследованной области t_{\max} , °С	Максимальная интенсивность напряжений, σ_i , МПа	Приведенная деформация, $\varepsilon_{a\text{ пр}}$, %	Допустимое число пусков, N_d	
				$n_N = 5$, $n_e = 1,5$	$n_N = 3$, $n_e = 1,25$
НС-2	527	373	0,11498	5300	8830
НС-1	527	484	0,12427	3960	6600
ХС	527	493	0,1416	2900	4830

Для корпуса ЦСД с учетом общего количества пусков 2978 допускаемое минимальное расчетное число пусков составляет порядка 2900, а при измененных запасах прочности – порядка 4830 и остаточное минимальное расчетное количество пусков для ЦСД составляет порядка 1852.

По данным Кураховской ТЭС пусков по типу НС-2 было 1209, НС-1 – 727 пусков, ХС – 539 пусков (всего 2475). При этом необходимо учитывать, что если энергоблок в период с 2012 по 2017 гг. работал в маневренном режиме (увеличенное количество пусков из неостывшего состояния НС-2 и горячего состояния ГС), то ресурсные характеристики могут существенно ухудшиться согласно проведенной для «ДТЭК Энерго» работы [8].

С учетом данных по малоциклового усталости металла корпусов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-200-130-3 (табл. 1–2) расчетная оценка повреждаемости, остаточной допускаемой наработки в годах и остаточного ресурса корпусов ЦВД и ЦСД для энергоблока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС представлена в табл. 3.

При определении остаточного ресурса корпусов оценка кратковременной статической прочно-

сти может выполняться по максимальному значению номинального эквивалентного напряжения σ , по рекомендациям [5]. Коэффициент запаса по пределу текучести материала цельнокованых роторов σ_{02}^B при расчетной температуре t на стационарном режиме должен удовлетворять условию $n'_T, n''_T \geq 1,5$.

Согласно расчетам (табл. 3) следует отметить, что большое текущее число циклов и чувствительность основного металла к переменным режимам устанавливаются с учетом нормативных коэффициентов запаса прочности ($n_N = 5$, $n_e = 1,5$) циклическую поврежденность на уровне $\Pi_{ц} = 59,03$ % для корпуса ЦВД и циклическую поврежденность на уровне $\Pi_{ц} = 58,72$ % для корпуса ЦСД. С учетом статической поврежденности обеспечивается суммарная поврежденность металла корпуса ЦВД $\Pi_{\Sigma} = 129,78$ % и суммарная поврежденность металла корпуса ЦСД $\Pi_{\Sigma} = 129,47$ %. Максимально допустимая суммарная поврежденность металла должна быть меньше 100 %, что не позволяет последующую эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД с коэффициентами запаса $n_N = 5$ и $n_e = 1,5$, а также

допускаемом времени работы металла на уровне 370 тыс. ч. согласно рекомендациям [5].

При коэффициентах запаса прочности по количеству циклов и по деформациям на уровне $n_N = 3$ и $n_\varepsilon = 1,25$, а также допускаемом времени работы металла 590 тыс. ч суммарная поврежденность металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-200-130-3 энергоблока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС составляет $\Pi_\Sigma = 79,62\%$, а корпуса ЦСД – $\Pi_\Sigma = 79,22\%$ (табл. 3). Остаточное расчетное количество пусков для ЦСД составляет порядка 2355, а для корпуса ЦВД – 3695 пуска с учетом измененных коэффициентов запасов прочности согласно рекомендациям [5].

Оценка кратковременной статической прочности корпусов ЦВД и ЦСД выполняется согласно рекомендациям [5]. Запасы кратковременной ста-

тической прочности корпусов ЦВД и ЦСД нигде не выходят за пределы допустимых ($n'_T \geq 1,5$), что позволяет дальнейшую эксплуатацию. Если экспертная комиссия (представители электрической станции и специализированных организаций) может допустить снижение коэффициентов запаса прочности по количеству циклов и по деформациям на уровне $3 \setminus 1,25$, а также принять допускаемое время работы металла на уровне 590 тыс. ч., то остаточный ресурс металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-200-130 энергоблока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС составляет 67018 ч, а корпуса ЦСД – 68645 ч. Это позволит продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 50 тыс. часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

Таблица 3 – Расчетная оценка повреждаемости, остаточной наработки в годах и остаточного ресурса корпусов ЦВД и ЦСД энергоблока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС

№	Наименование	Формула	Корпус ЦВД		Корпус ЦСД	
1.	Температура металла	$t, ^\circ\text{C}$	509		527	
2.	Интенсивность напряжений	$\sigma_{\text{imax}}, \text{МПа}$	105		104,4	
3.	Предел текучести	$\sigma_{0,2^B}, \text{МПа}$	210,0		210,0	
4.	Ном. экв. напряжение	$\sigma_3, \text{МПа}$	114		113	
5.	Запас прочности по σ_{imax}	$n'_T = \sigma_{0,2^B} / \sigma_{\text{imax}}$	2		2,011	
6.	Запас прочности по σ_3	$n''_T = \sigma_{0,2^B} / \sigma_3$	1,842		1,858	
7.	Общее число пусков по данным КуТЭС	$n_{\text{общ}}$	2475		2475	
8.	Общая наработка по данным КуТЭС	$\tau_{\text{общ}}, \text{ч}$	261773		261773	
9.	Коэффициенты запаса	$n_N \setminus n_\varepsilon$	5 \ 1,5	3 \ 1,25	5 \ 1,5	3 \ 1,25
10.	Допускаемое число циклов по различным типам пусков	$[N_{pl}] n_{\text{НС-2}} = 1209$	4600	7670	5300	8830
		$[N_{pl}] n_{\text{НС-1}} = 727$	4000	6670	3960	6600
		$[N_{pl}] n_{\text{ХС}} = 539$	3700	6170	2900	4830
11.	Цикл. поврежденность	$[\Pi_{\text{ц}}] = \sum n_i / [N_{pl}], \%$	59,03	35,40	58,72	35,23
12.	Допус. время работы	$[t_{pl}], \text{ч}$	$3,7 \times 10^5$	$5,9 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$5,9 \times 10^5$
13.	Стат. поврежденность	$[\Pi_{\text{ст}}] = \sum \tau_{\text{общ}} / [t_{pl}], \%$	70,75	44,22	70,75	44,00
14.	Сумм. поврежденность	$[\Pi_\Sigma] = [\Pi_{\text{ст}}] + [\Pi_{\text{ц}}], \%$	129,78	79,62	129,47	79,22
15.	Остаточный ресурс	$T_{\text{ост}} = G \times \tau_{\text{год}}, \text{ч}$	<0	67018	<0	68645

Таблица 4 – Расчетная оценка повреждаемости, остаточной наработки в годах и остаточного ресурса корпусов ЦВД и ЦСД энергоблока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС

№	Наименование	Формула	Корпус ЦВД		Корпус ЦСД	
1.	Общее число пусков по данным КуТЭС	$n_{\text{общ}}$	2978		2978	
2.	Общая наработка по данным КуТЭС	$\tau_{\text{общ}}, \text{ч}$	243785		243785	
3.	Коэффициенты запаса	$n_N \setminus n_\varepsilon$	5 \ 1,5	3 \ 1,25	5 \ 1,5	3 \ 1,25
4.	Допускаемое число циклов по различным типам пусков	$[N_{pl}] n_{\text{НС-2}} = 1549$	4600	7670	5300	8830
		$[N_{pl}] n_{\text{НС-1}} = 774$	4000	6670	3960	6600
		$[N_{pl}] n_{\text{ХС}} = 656$	3700	6170	2900	4830
5.	Цикл. поврежденность	$[\Pi_{\text{ц}}] = \sum n_i / [N_{pl}], \%$	70,73	42,42	70,07	42,04
6.	Допус. время работы	$[t_{pl}], \text{ч}$	$3,7 \times 10^5$	$5,9 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$5,9 \times 10^5$
7.	Стат. поврежденность	$[\Pi_{\text{ст}}] = \sum \tau_{\text{общ}} / [t_{pl}], \%$	65,89	41,18	65,89	40,97
8.	Сумм. поврежденность	$[\Pi_\Sigma] = [\Pi_{\text{ст}}] + [\Pi_{\text{ц}}], \%$	136,62	83,60	135,96	83,01
9.	Остаточный ресурс	$T_{\text{ост}} = G \times \tau_{\text{год}}, \text{час}$	<0	47837	<0	49884

Для энергоблока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС статистика пусков блоков из различных тепловых состояний (по часам) за период с 01.02.1993 по 01.02.2006 составляла 366 пусков после 6–10 часов простоя, 60 пусков после 15–20 часов простоя, 59 пусков после 30–35 часов простоя, 64 пуска после 50–60 часов простоя и 151 пуск из холодного состояния (всего 700 пусков).

В условиях отсутствия полной статистики по пускам из различных тепловых состояний паровой турбины К-200-130-3 блока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС по состоянию на август 2017 года приближенно можно считать, что для ЦВД и ЦСД пусков по типу НС-2 было 1549 (52 %), НС-1 было 774 (26 %) пусков и из ХС соответственно 655 пуска (22 %), всего 2978 пусков.

Расчетная оценка повреждаемости, остаточной допускаемой наработки в годах и индивидуального остаточного ресурса согласно рекомендациям [5, 6] для энергоблока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС представлена в табл. 4.

Согласно выполненным расчетам (табл. 4) следует отметить, что суммарная поврежденность превышает предельно допустимое значение в 100 % для обоих корпусов (ЦВД – $P_{\Sigma} = 136,62$ %; ЦСД – $P_{\Sigma} = 135,96$ %) при коэффициентах запаса $n_N = 5$ и $n_{\epsilon} = 1,5$, а также допускаемом времени работы металла 370 тыс. ч. При переходе к уточненным коэффициентам запаса и расчетному допустимому времени работы, суммарная поврежденность металла корпуса ЦВД составляет 83,6 %, а корпуса ЦСД – 83 %. Остаточное расчетное количество пусков для ЦСД составляет порядка 1852, а для корпуса ЦВД – 3192 пуска. Аналогично к блоку № 4, если экспертная комиссия может допустить снижение коэффициентов запаса прочности по количеству циклов и по деформациям на уровне 3,1,25, а также принять допускаемое время работы металла на уровне 590 тыс.ч., то индивидуальный остаточный ресурс металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-200-130 энергоблока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС составляет 47837 ч, а корпуса ЦСД – 49884 ч. Это позволит продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 45 тыс. часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

Выводы и рекомендации

1. Расчеты на малоцикловую усталость и статическую поврежденность корпусов ЦВД, ЦСД паровой турбины К-200-130-3 блока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС показали, что суммарная поврежденность металла корпуса ЦВД составляет 79,62 %, а корпуса ЦСД – 79,22 % при коэффициентах запаса прочности по количеству циклов и по деформациям на уровне 3 и 1,25, а также допускаемом времени работы металла 590 тыс. ч. Остаточное расчетное количество пусков для ЦСД состав-

ляет порядка 2355, а для корпуса ЦВД – 3695 пуска с учетом измененных коэффициентах запасов прочности.

2. Если экспертная комиссия может допустить снижение коэффициентов запаса прочности, то индивидуальный остаточный ресурс металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-200-130 энергоблока № 4 ДТЭК Кураховская ТЭС составляет 67018 ч, а корпуса ЦСД – 68645 ч. Это позволит продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 50 тыс. часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

3. С учетом аналогичного снижения коэффициентов запаса прочности и повышения допускаемого времени работы, текущая поврежденность основного металла корпусов ЦВД и ЦСД составляет 83,6 % и 83 % соответственно. В таком случае остаточный ресурс металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-200-130 энергоблока № 5 ДТЭК Кураховская ТЭС составляет 47837 ч, а корпуса ЦСД – 49884 ч. Это позволяеь продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 45 тыс. часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

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

5. Рекомендуются при пусковых режимах по типу НС-2 нагужение вести по графику НС-1 с повышением предтопчковой температуры свежего пара и пара промперегрева до 450–500 °С. При пуске турбины по типу НС-2 в ЦСД подавать пар более высокой температуры на переднее уплотнение (порядка 400 °С). Оптимизировать количество пусков по типу ХС в сторону уменьшения. При переходе к эксплуатации турбины за пределами паркового срока службы желательно обратить внимание на состояние системы обогрева фланцев и шпилек с подводом греющего пара в обнизку. Необходимо исключить возможность заброса влажного пара на фланцы и, особенно, на шпильки в момент включения системы.

6. Для предотвращения попадания конденсата в нижнюю часть ЦВД и ЦСД и резкого захлаживания внутренней стенки при пусковых и остановочных режимах внедрить дополнительные мероприятия по повышению надежности работы дренажей.

7. С целью уточнения запасов прочности металла корпусов и роторов ЦВД и ЦСД по деформациям n_{ϵ} , числу циклов n_N , по пределам текучести n_T и запасов по номинальным напряжениям $n_{дп}$ провести исследования по влиянию старения на изменение физико-механических свойств конструкционных легированных сталей при эксплуатационных и повышенных температурах.

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 МПЕ 40.1-21677681-52:2011 Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбіни : методичні вказівки / Міненерговугілля України / М. Г. Шульженко. Офіц. вид., 2011. 24 с.
3. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Расчетное исследование теплового и напряженно-деформированного состояния ротора высокого давления турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5». *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 9(1231). Бібліогр.: 8 назв. С. 34-40. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.
4. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Оценка малоциклового усталости, поврежденности и остаточного ресурса ротора высокого давления турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5». *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 10 (1232). Бібліогр.: 5 назв. С. 29-37. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.10.04.
5. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость. Москва, 1985. № АЗ-002/7382. 49 с.
6. 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. Москва, 1996. 98 с.
7. Peshko, V., Chernousenko, O., Nikulenkova, T. [et. al.] (2016), 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*. Volume 5. Issue 4. pp. 302–309.
8. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 10(1182). Бібліогр.: 7 назв. С. 6–17. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.
- 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.
2. 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 vkazivky' / Minenergovugillya Ukrayiny' [Determination of the estimated resource and assessment of survivability of rotors and turbine case details: Guidelines]*, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
3. Chernousenko, O. and Peshko, V. (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
4. 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
5. (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovyh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuyu ustalost' [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation]*, Moscow, Russian.
6. (1996), RD 34.17.440-96. *Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedeniya rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovyh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatacii 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.
7. Peshko, V., Chernousenko, O., Nikulenkova, T. [et. al.] (2016), 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*, Volume 5, Issue 4, pp. 302-309.
8. Chernousenko, O. and Peshko, V. (2016), "Influence of the Operation of the Power Units of Thermal Power Plants in the Maneuvering Mode on the Aging Rate of Power Equipment", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 10(1182), pp. 6–16, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.

References (transliterated)

Поступила (received) 03.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Черноусенко Ольга Юрійвна (Черноусенко Ольга Юрьевна, Chernousenko Olga Yuriivna) – доктор технічних наук, професор, КПП ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 504–82–92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>.

Риндюк Дмитро Вікторович (Рындюк Дмитрий Викторович, Rindyuk Dmitro Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (099) 055–47–04; e-mail: rel_dv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7770-7547>.

Пешко Віталій Анатолійович (Пешко Виталий Анатольевич, Peshko Vitaliy Anatoliyovych) – кандидат технічних наук, КПП ім. Ігоря Сікорського, асистент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>.