

УДК 621.165.62-192

О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, д-р техн. наук; проф. НТУУ «КПИ», Киев

ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС СТОПОРНЫХ КЛАПАНОВ ЦВД И ЦСД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-800-240 СЛАВЯНСКОЙ ТЭС

Предложена оценка повреждения и остаточного ресурса корпусов стопорных клапанов высокого и среднего давления паровых турбин большой мощности с определением повреждаемости с учетом ремонтных восстановительных изменений конструкции в период эксплуатации. Приведены расчетные данные малоциклового усталости металла корпусов стопорных клапанов высокого и среднего давления и остаточные сроки их эксплуатации для паровой турбины К-800-240 энергоблока № 7, работавших в разных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: поврежденность и остаточный ресурс, малоцикловая усталость металла, повреждаемость, ремонтные возобновляемые изменения конструкции.

Введение. Стопорные клапана ЦВД и ЦСД паровой турбины К-800-240 Ленинградского металлического завода представляют собой литые толстостенные конструкции, подвергаются воздействию высоких температурных нагрузок на стационарных режимах и значительных температурных скачков на переменных режимах работы. Стоимость этих элементов паротурбинной установки значительна. Надежная работа стопорных клапанов ЦВД и ЦСД паровой турбины определяет работоспособность всего энергоблока. Таким образом, ресурс этих элементов энергоблоков требует оценки с целью продления срока их эксплуатации согласно нормативным документам [1–3].

Как уже указывалось ранее [4], при расчетной оценке ресурса паровых турбин не учитывались конструктивные изменения в элементах энергетического оборудования, которые образовались на протяжении всего срока эксплуатации (выборки металла в местах появления трещин и растрескиваний, проточки роторов по канавкам уплотнений и др.). Такие конструктивные меры вызывают ремонтно-восстановительные изменения конструкции клапанов ЦВД и ЦСД в процессе планово-предупредительных ремонтов.

В работе применен комплексный подход к оценке остаточного ресурса стопорных клапанов паровой турбины большой мощности [4], использованный для оценки остаточного ресурса высокотемпературных корпусов и роторов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-800-240. Современное развитие вычислительной техники позволяет усложнить расчетные модели литых элементов паровых турбин, таких как клапана, путем создания в редакторах (*AVTOSCAD*, *Solid works* и др.) трехмерных моделей энергетических объектов.

Расчетное исследование теплового и напряженно-деформированного состояния корпусов стопорных клапанов турбины К-800-240. Порядок поверочного расчета высокотемпературных элементов, а именно для корпусов и роторов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-800-240 подробно описан в [5–6]. Разработана методика 3-D конструирования элементов турбомашин с применением программного продукта *Solidworks* и учетом технологических выборок материала элементов оборудования, которые образовались при механической обработке трещин, растрескиваний и промоин на поверхностях клапанов в процессе эксплуатации. Технологические выборки материала элементов оборудования получены по результатам визуального контроля и

© О.Ю. Черноусенко, 2013

магнитопорошкової діагностики (данні експлуатуючих організацій і лабораторій металу ТЭС). Во время візуального огляду 2008 року блоку ст. №7 в відповідності з вимогами нормативного документа [1] були вироблені візуальний огляд, травлення, визначення механічних властивостей основних корпусних деталей автоматичних стопорних клапанів (АСК) ЦВД турбіни К-800-240 (Заключення № 286-08 Слав'янської ТЭС) і автоматичних захисних клапанів (АЗК) ЦСД турбіни К-800-240 (Заключення № 280-05 Слав'янської ТЭС). В першому випадку виявлені тріщини довжиною до 8 мм в місці установки конічного ущільнювального кільця. Во другому – тріщини і скоплення пор на внутрішній поверхні розміром 120×90×12 мм, 90×35×17 мм і на зовнішній поверхні розміром 70×50×12 мм, 80×70×9 мм, 95×40×10 мм. Других дефектів не виявлено.

В розрахункових моделях АСК ЦВД смодельовані продольні виборки розміром 8 мм в місці установки конічного ущільнювального кільця. Також в розрахункових моделях АЗК ЦСД смодельовані продольні виборки розміром 120×90×12 мм, 90×35×17 мм і на зовнішній поверхні розміром 70×50×12 мм, 80×70×9 мм, 95×40×10 мм (рис. 1).

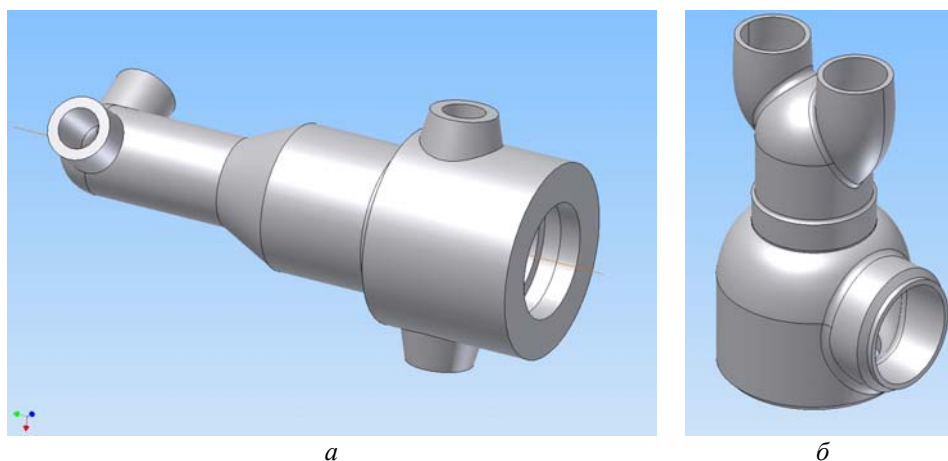


Рис. 1 – Розрахункова модель АСК ЦВД (а) і АЗК ЦСД (б) турбіни К-800-240

Розрахунок теплового (ТС) і напружено-деформованого стану (НДС) проведено з допомогою програмних комплексів *ANSYS* і *COSMOSWorks* при граничних умовах теплообміну на поверхнях 3-*D* моделей клапанів ЦВД і ЦСД турбіни К-800-240 ст. № 7, які відповідали експлуатаційним режимам по типу пусків з холодного стану (ХС), гарячого (ГС) і неостывших станів (НС), стаціонарного режиму.

Для корпусу АСК ЦВД максимальний градієнт температур при пуску з ХС (рис. 2б) має місце в момент утримання на 360 МВт, відповідний часу 25800 с з початку пуску. Теплове стан патрубків підводу і відводу пари корпусу АСК ЦВД визначається температурами металу порядку 455 °С (рис. 2а). Максимальні умовні епружні напруження виникають при пусках з ХС і ГС. Величина інтенсивності умовних епружних напружень від спільного впливу різниці температури і впливу тиску пари в корпусі АСК ЦВД відзначена в зоні відводу пари $\sigma_{\text{іmax}} = 144,7$ МПа і в зоні під кришкою корпусу клапана $\sigma_{\text{іmax}} = 117,8$ МПа в момент часу 25800 с при пуску з ХС (рис 2б). Максимальні умовні епружні напруження при пуску з ГС в області горла клапана рівні 123 МПа в момент часу 6780 с.

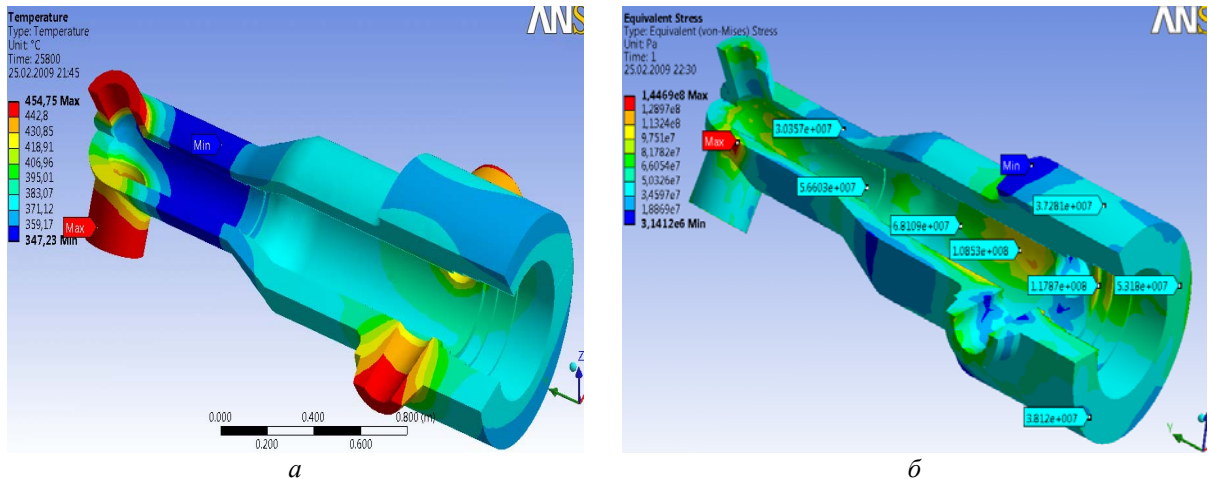


Рис. 2 – ТС (а) и НДС (б) АСК ЦВД при пуске из ХС. Выдержка на 360 МВт (25800 с)

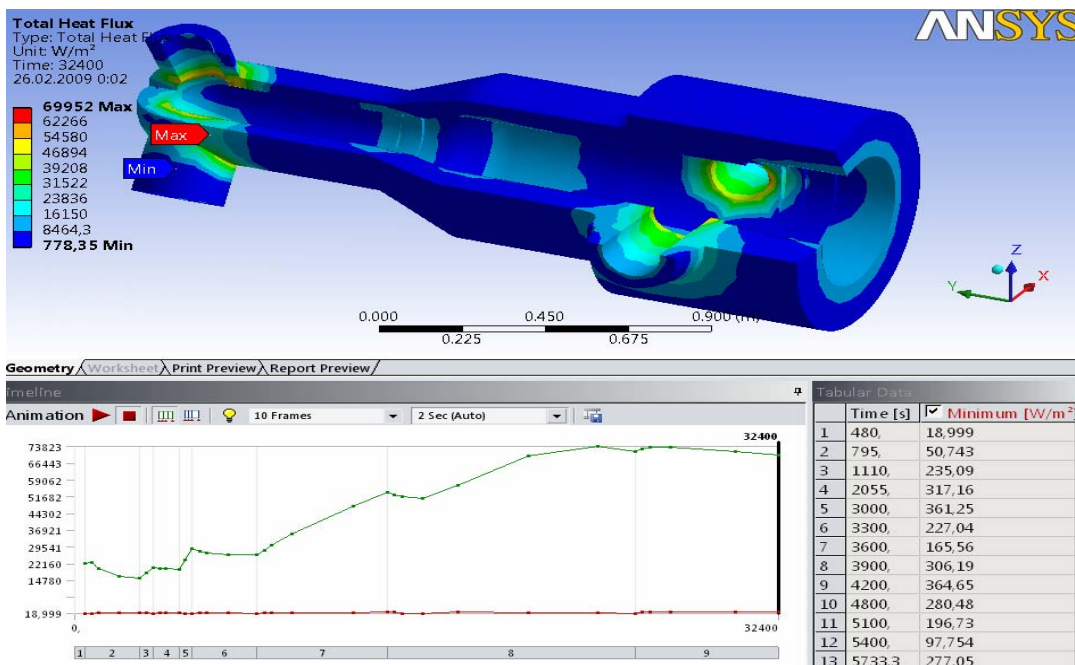


Рис. 3 – Изменение теплового потока в АСК ЦВД при пуске из ХС

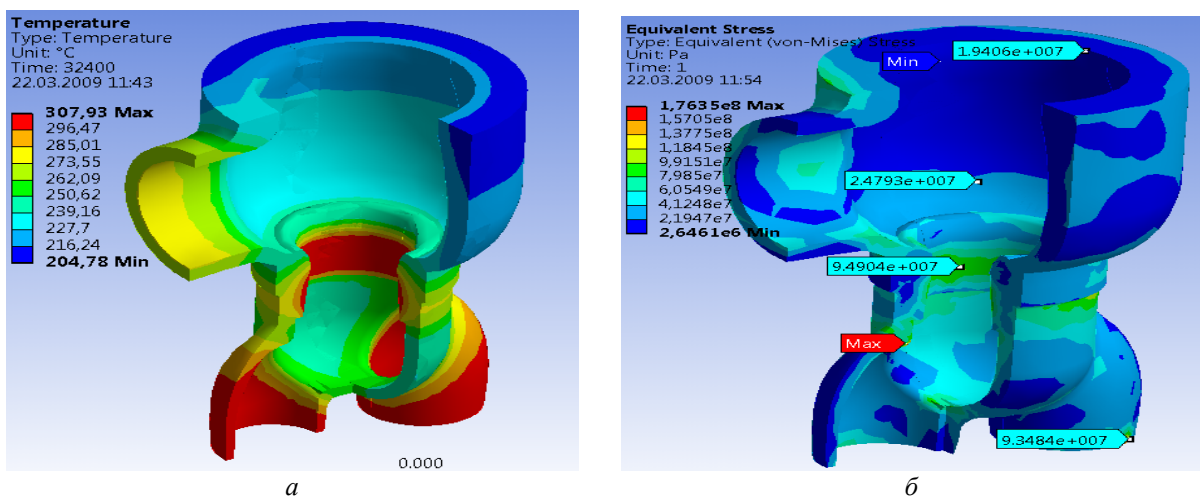


Рис. 4 – ТС (а) и НДС (б) АЗК ЦСД при пуске из ХС. Нагрузка 800 МВт (32400 с)

Тепловой поток в корпусе клапана АСК ЦВД возрастает в процессе пуска из ХС в 3 раза и имеет локальные максимумы в начальный период пуска (рис. 3). Общий уровень напряжений в корпусе клапана АСК ЦВД составляет 49–72 МПа при пусках, что не превышает допустимых прочностных характеристик для данного материала.

При резких изменениях температуры свежего пара в процессе нагружения турбины, а также при предтолчковом прогреве, когда при конденсации пара на внутренней поверхности металла клапана возникает температурный удар, напряжения в стенке клапана в местах конденсатных пятен максимальны и могут достигать 450–550 МПа и более. Это может вызвать развитие и углубление литейных дефектов металла клапана и привести к возникновению и развитию трещин.

Тепловое состояние патрубков подвода и отвода пара корпуса АЗК ЦВД определяется температурами металла порядка (296–310) °С при пуске из ХС с нагрузкой 800 МВт и моментом времени от начала пуска 32400 с (рис. 4а). Для клапана АЗК ЦСД необходимо отметить, что максимальные напряжения возникают при пусках из ХС и ГС, однако они не превышают 155–180 МПа. Максимум напряжений смещается в область высоких давлений, что соответствует конечным этапам пуска. При пуске из ХС максимальное значение интенсивностей условных упругих напряжений $\sigma_{i\max} = 176,35$ МПа находится на внутренней поверхности корпуса в нижней части клапана в момент выхода на номинальный режим, соответствующий времени 32400 с (рис. 4б).

Результаты расчетов АЗК ЦСД показали, что общий уровень напряжений в клапане не превысил 35–55 МПа, что соответствует допустимым прочностным характеристикам для данного материала. Максимальные напряжения в корпусе клапана возникают в горловом сечении в зоне седла.

Поврежденность и остаточный ресурс корпусов стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД паровой турбины К-800-240. Данные теплового и напряженно-деформированного состояния корпусов клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД при пусках из характерных тепловых состояний с учетом ремонтно-восстановительных мероприятий согласно данным обследования «Донбассэнергонадка» и лаборатории металлов СЕ «Славянская ТЭС» позволяют провести расчеты малоциклового усталости металла корпусов стопорных клапанов.

Поверочный расчет на малоцикловую усталость корпусов стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД паровой турбины К-800-240 ст. № 7 выполнен на основании анализа действующих нагрузок и температурных полей в клапанах ЦВД и ЦСД турбины при типичных пусковых режимах. Учтены полученные максимальные и минимальные значения интенсивностей напряжений при стационарных и переходных режимах работы турбоустановки.

Результаты расчетной оценки малоциклового усталости корпуса клапана АСК ЦВД и АЗК ЦСД с учетом повреждаемости корпусов путем организации выборок металла в местах образования трещин представлены в табл. 1. Размеры и глубины выборок принимались согласно данным последнего визуального контроля металла литых корпусных деталей турбины К-800-240 блока ст. № 7. В таблице 1 представлены температура по толщине стенки клапана, интенсивности напряжений, приведенная деформация корпуса АСК ЦВД и допускаемое число циклов до разрушений.

Таблица 1

Расчетная оценка малоциклового усталости металла корпуса АСК ЦВД

АСК ЦВД	Температура по толщине стенки клапана t_{\max} , °С	Интенсивность напряжений, σ_i , МПа	Приведенная деформация, $\epsilon_{a\text{ пр}}$, %	Допускаемое число пусков, N_d
				При $n_{\text{ц}} = 5$ и $n_{\text{э}} = 1, 5$
ГС	588	158,7	0,07749	10000
НС-1	483	128,0	0,05076	$>1 \cdot 10^4$
ХС	454	172,6	0,06040	$>1 \cdot 10^4$

Для стопорного клапана ЦСД (АЗК ЦСД) температура стенки клапана, интенсивности напряжений, приведенная деформация и допускаемое число циклов до разрушений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчетная оценка малоциклового усталости металла корпуса АЗК ЦСД

АЗК ЦСД	Температура по толщине стенки клапана t_{\max} , °С	Интенсивность напряжений, σ_i , МПа	Приведенная деформация, $\epsilon_{a\text{ пр}}$, %	Допускаемое число пусков, N_d
				При $n_{\text{ц}} = 5$ и $n_{\text{э}} = 1, 5$
ГС	509	185,00	0,0720	$>1 \cdot 10^4$
НС-1	487	158,00	0,0395	$>1 \cdot 10^4$
ХС	427	176,35	0,0680	$>1 \cdot 10^4$

В случае тепловых ударов на начальных этапах пусков, а также при попадании влаги в горячий клапан возможно повышение напряжений до 590–630 МПа. В этом случае допустимое число циклов резко падает и может составить величину порядка 2000–1900.

С использованием данных по тепловому, напряженно-деформированному состоянию и малоциклового усталости корпусов стопорных клапанов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-800-240 (табл. 1 и 2) получена расчетная оценка поврежденности, остаточной допускаемой наработки в годах и индивидуального остаточного ресурса корпусов АСК ЦВД и АЗК ЦСД для энергоблока ст. № 7 Славянской ТЭС (табл. 3). Расчетная поврежденность металла корпусов клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД турбоагрегата К-800-240 ст. № 7 Славянской ТЭС составляет 4 %. Индивидуальный остаточный ресурс превышает 50000 часов, что позволяет продлить эксплуатацию корпусов АСК ЦВД и АЗК ЦСД на 50000 часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

В случае тепловых ударов на начальных этапах пусков, а также при попадании влаги в горячий клапан возможно повышение напряжений и снижение общего числа пусков. Поврежденность корпусов клапанов может существенно повыситься и составить порядка (40–70) %. Это повлечет за собой существенное снижение индивидуального ресурса.

Расчетная оценка поврежденности, остаточной наработки и индивидуального остаточного ресурса корпусов АСК ЦВД, АЗК ЦСД энергоблока ст.№7 Славянской ТЭС

Наименование	Формула	АСК ЦВД	АЗК ЦСД
Допускаемое число циклов по различным типам пусков	$[N_{pl}] n_{ГС} = 125$	10000	$>1 \cdot 10^4$
	$[N_{pl}] n_{НС-1} = 250$	$>1 \cdot 10^4$	$>1 \cdot 10^4$
	$[N_{pl}] n_{ХС} = 38$	$>1 \cdot 10^4$	$>1 \cdot 10^4$
Циклическая поврежденность	$[\Pi_{ц}] = \sum n_i / [N_{pl}]$	0,0413	0,0413
Наработка	$T, \text{ час}$	239934	239934
Число часов работы в год	$\tau_{год} = T/z, \text{ час}$	6485,0	6485,0
Годовая циклическая поврежденность	$[\Pi_{г''}] = \sum n_{г''} / [N_{pl}]$	0,001086	0,001086
Остаточная наработка с учетом запасов $n_{п'}$ и $n_{п''}$	$G = \{1 - [n_{п'} \Pi']\} / [n_{п''} \Pi_{г''}], \text{ год}$	145,27	145,27
Индивидуальный остаточный ресурс	$T_{ост} = G \times \tau_{год}, \text{ час}$	942108	942108
Минимальное число пусков $[N_{min}]$	$[N_{min}] = \min [N_{ХС}, N_{НС-1}, N_{ГС}]$	10000	10000
Общее число пусков	$n_{общ}$	413	413
Циклическая поврежденность (упрощенная формула)	$[\Pi_{ц}]_{упрощ.} = \sum n_{общ} / [N_{min}]$	0,0413	0,0413
Суммарная поврежденность за год (упрощенная формула)	$[\Pi_{г''}] = [\Pi_{ц''}]_{упрощ.} / z$	0,001086	0,001086
Остаточная наработка (с учетом запаса $n_{п}$)	$G = \{1 - [n_{п'} \Pi']\} / [n_{п''} \Pi_{г''}], \text{ год}$	145,27	145,27
Индивидуальный остаточный ресурс (упрощенная формула)	$T_{ост}' = G \times \tau_{год}, \text{ час}$	942108	942108
Остаточный ресурс	$\min [T_{ост}; T_{ост}'], \text{ час}$	942108	942108

Выводы

1 Расчетная степень выработки ресурса металла корпусов стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД за прошедший срок эксплуатации турбины ст. № 7 составляет 4 %. Допустимое дополнительное расчетное число пусков не ограничено. Индивидуальный остаточный ресурс составляет более 50000 часов при запасе поврежденности на прогнозируемый период $n_{п''} = 5$, что позволяет продлить эксплуатацию корпусов стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД на 50000 часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

2 При температурном ударе (заброс конденсата и др.) температурные напряжения в стенке клапана в местах конденсатных пятен максимальны и могут достигать значительных величин. Трещины в ребре жесткости клапана АСК ЦВД могут возникнуть на начальных этапах пусков, поэтому надо строго придерживаться режимных карт пусков по температурным разностям.

3 Продление эксплуатации паровых турбин большой мощности сверх паркового ресурса возможно на основе комплексного обследования стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД за прошедший срок эксплуатации турбины.

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. 2. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – М., 1985. – № АЗ-002/7382. – 49 с. 3. 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. 4. Черноусенко, О.Ю. Комплексный подход оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровых турбин, отработавших парковый ресурс [Текст] / О.Ю. Черноусенко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 2. – С. 59-64. – ISSN 2078-774X. 5. Черноусенко, О.Ю. Оценка поврежденности и остаточного ресурса высокотемпературных корпусов паровой турбины К-800-240 Славянской ТЭС [Текст] / О.Ю. Черноусенко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2012. – № 7. – С. 104-111. – ISSN 2078-774X. 6. Черноусенко, О.Ю. Моделирование высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 800 МВт и оценка остаточного ресурса ее валопровода [Текст] / О.Ю. Черноусенко // Энергетика и электрификация. – 2012. – № 5. – С. 45-45. – ISSN 0424-9879

Поступила в редколлегию 15.02.13

УДК 621.165.62-192

Поврежденность и остаточный ресурс стопорных клапанов ЦВД и ЦСД паровой турбины К-800-240 Славянской ТЭС [Текст] / О.Ю. Черноусенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 100-106. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X.

Запропоновано оцінку пошкодження та залишкового ресурсу корпусів стопорних клапанів високого та середнього тиску парових турбін великої потужності з визначенням пошкоджуваності з урахуванням ремонтних відновлюваних змін конструкції в період експлуатації. Наведено розрахункові данні мало циклової утомленості металу корпусів стопорних клапанів високого та середнього тиску та залишкові терміни їх експлуатації для парової турбіни К-800-240 енергоблоку № 7, що працювали в різних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: пошкодження та залишковий ресурс, малоциклова утомленість металу, пошкоджуваність, ремонтні відновлювані зміни конструкції.

The enrichment and approach to an estimation of a residual resource of shut-off valve of cylinders of high and middle pressure of steam turbines of the big capacity with definition of damages taking into account repair regenerative changes of a design in operation. Are resulted settlement data of long durability of metal of shut-off valve of cylinders of average pressure and residual terms of operation of steam turbines К-800-240 of power units № 7 which worked in different operational conditions.

Keywords: an estimation, residual resource, definition of damages, repair regenerative changes of a design in operation.