

УДК 621.165.62-192

О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, канд. техн. наук

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
г. Киев, e-mail: cher\_olya@ckc.com.ua*

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА КОРПУСОВ  
ЦВД, ЦСД, КОРПУСОВ СТОПОРНЫХ КЛАПАНОВ И РОТОРОВ К-200-130  
БЛОКА 200 МВт**

Запропонована розрахункова оцінка індивідуального ресурсу турбіни К-200-130 з визначенням теплового стану (ТС), напружено-деформованого стану (НДС) та малоциклової утомлюваності корпусів, роторів, стопорних клапанів ЦВТ та ЦСТ при характерних режимах роботи енергоблоку.

The calculated estimation of individual resource of turbine K-200-130 is offered with calculating heat state (HS), stressed-deformed state (SDS), and little cycle of lassitude of corps, rotors, catch valves of CHP and CMP for exploitation modes energy blokes.

На тепловых электростанциях Украины в эксплуатации находятся 43 энергоблока с турбинами К-200-130 и К-210-130 различных модификаций. Ввод их осуществлялся с 1963 по 1988 г.г., и к настоящему времени наработка значительной части турбин К-200-130 превзошла 200000 ч. или приближается к этому значению. Для продления сроков эксплуатации энергоблоков 200 МВт необходимо определить индивидуальный ресурс турбины К-200-130-3 на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля металла с поверочными расчетами на прочность и долговечность [1-4]. При оценке ресурса наметилась тенденция к переходу от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанным на сочетании механики разрушений, металловедения и неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования [5-8].

Для определения индивидуального ресурса турбины К-200-130 выполнена расчетная оценка теплового состояния (ТС), а также напряженно-деформированного состояния (НДС) и малоциклового усталости ЦВД, ЦСД, АСК ЦВД и АЗК ЦСД при характерных режимах работы.

Моделирование теплового и напряженно-деформированного состояний роторов и корпусов ЦВД и ЦСД осуществляли в осесимметричной постановке. Технологические особенности режимов работы учитывали заданием тепловых граничных условий III рода и объемных центробежных усилий в расчетных элементах роторов. Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  вычисляли по рекомендациям [9].

Анализ температурных полей и напряжений в РВД и РСД показал, что они очень неравномерны как в осевом, так и в радиальном направлении при всех пусковых режимах. При пусках из неостывшего состояния НС-2 (после простоя 5-6 ч.) изменение параметров пара в цилиндрах в начальный период существенно влияет на тепловое состояние дисков и вала ротора и мало отражается на температурном состоянии концевых уплотнений, которые еще до толчка ротора (примерно 30 мин.) омываются горячим паром ( $t_n = 250^\circ\text{C}$ ), подаваемым в первые камеры концевых уплотнений. Поэтому наибольшие напряжения появляются в зоне первых ступеней ЦВД и ЦСД.

При пусках из НС-2 характерно некоторое начальное захлаживание наружной поверхности роторов с разностью температур по радиусу в сечении у диска 13-ой ступени со стороны 14-ой ступени РСД до  $-41^{\circ}\text{C}$  на начальном этапе нагружения, что соответствует интенсивности напряжений растяжения в этой области  $\sigma_i = 255 \text{ МПа}$ . В конце режима нагружения разность температуры становится положительной ( $\Delta t = 50^{\circ}\text{C}$ ), что соответствует минимальным напряжениям  $\sigma_i = 271 \text{ МПа}$ . Напряжения у корневой части диска со стороны передних уплотнений равны  $\sigma_i = 200 \text{ МПа}$ , а на расточке ротора –  $210 \text{ МПа}$ . Также велики напряжения у корневой части диска 14-ой ступени – соответственно  $205 \text{ МПа}$  и  $177 \text{ МПа}$ .

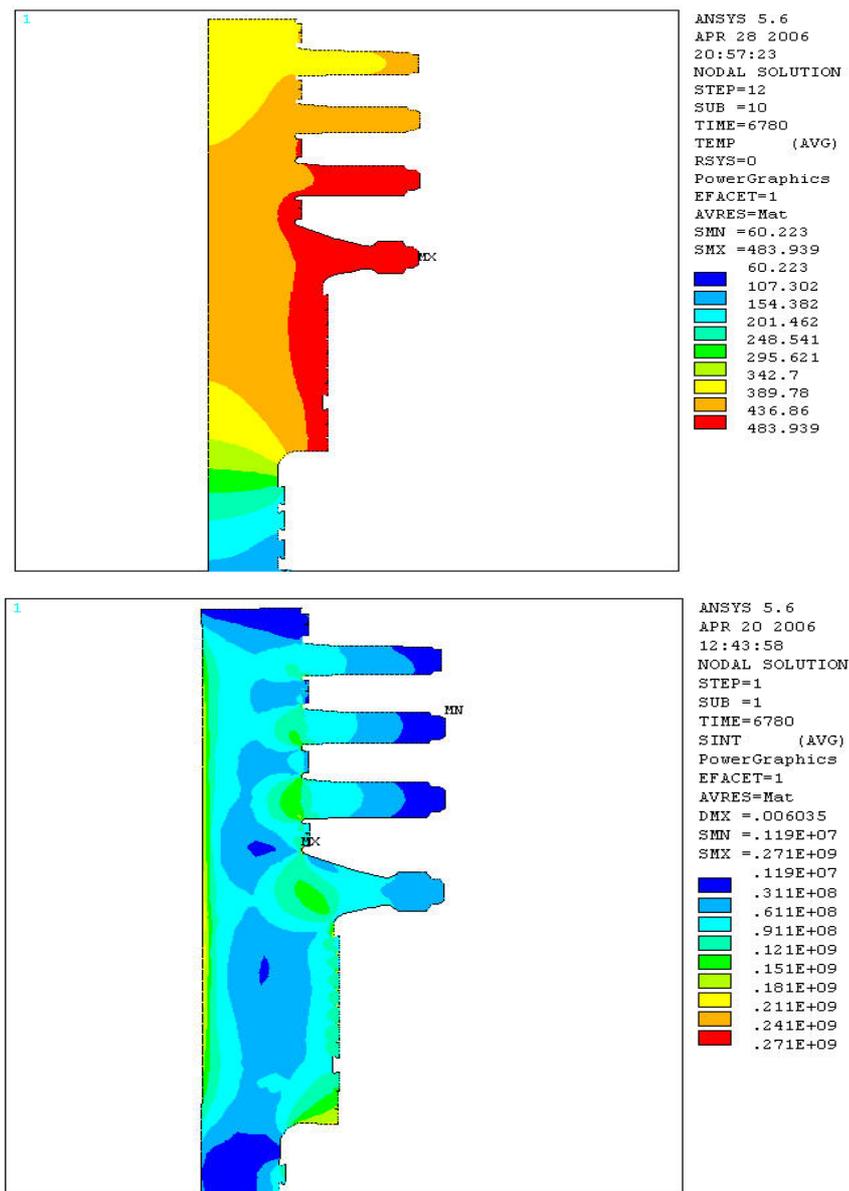


Рис. 1. ТС и НДС РСД при пуске НС-2 ( $N_3 = 200 \text{ МВт}$ )

Интенсивность напряжений от разности температуры и действия давления пара в ЦВД максимальна в зоне регулирующей ступени в месте радиусного перехода крепления обоймы ПКУ к камере регулирующей ступени и на наружной поверхности ( $69 \text{ МПа}$ ). В ЦСД интенсивность напряжений максимальна в месте соединения

цилиндрической части, в которую вставляются обоймы переднего концевой уплотнения, и паровпуска (150 МПа). При пуске турбины из НС-2 для малоцикловой термоусталости существенное значение имеет захлаживание внутренней стенки корпусов ЦВД и ЦСД паром (в зоне регулирующей ступени ЦВД и паровпуска ЦСД) при развороте и выходе на режим холостого хода с последующим появлением положительных разностей температуры по толщине стенки при достижении полных параметров пара ( $\Delta t_{ст}$  изменялась от  $-4$  до  $+12$  °С). Напряжения в зоне паза под обойму переднего уплотнения составляют  $\sigma_i = 87$  МПа, заднего равны  $\sigma_i = 50$  МПа.

В корпусе ЦСД в зоне перехода от цилиндрической части, в которой крепится обойма ПКУ к паровпускной улитке, интенсивность напряжений меняется от 24 МПа до 127 МПа. В зоне крепления обоймы ПКУ напряжения меняются от 200 МПа до 128 МПа вдоль цилиндрического участка (рис. 2).

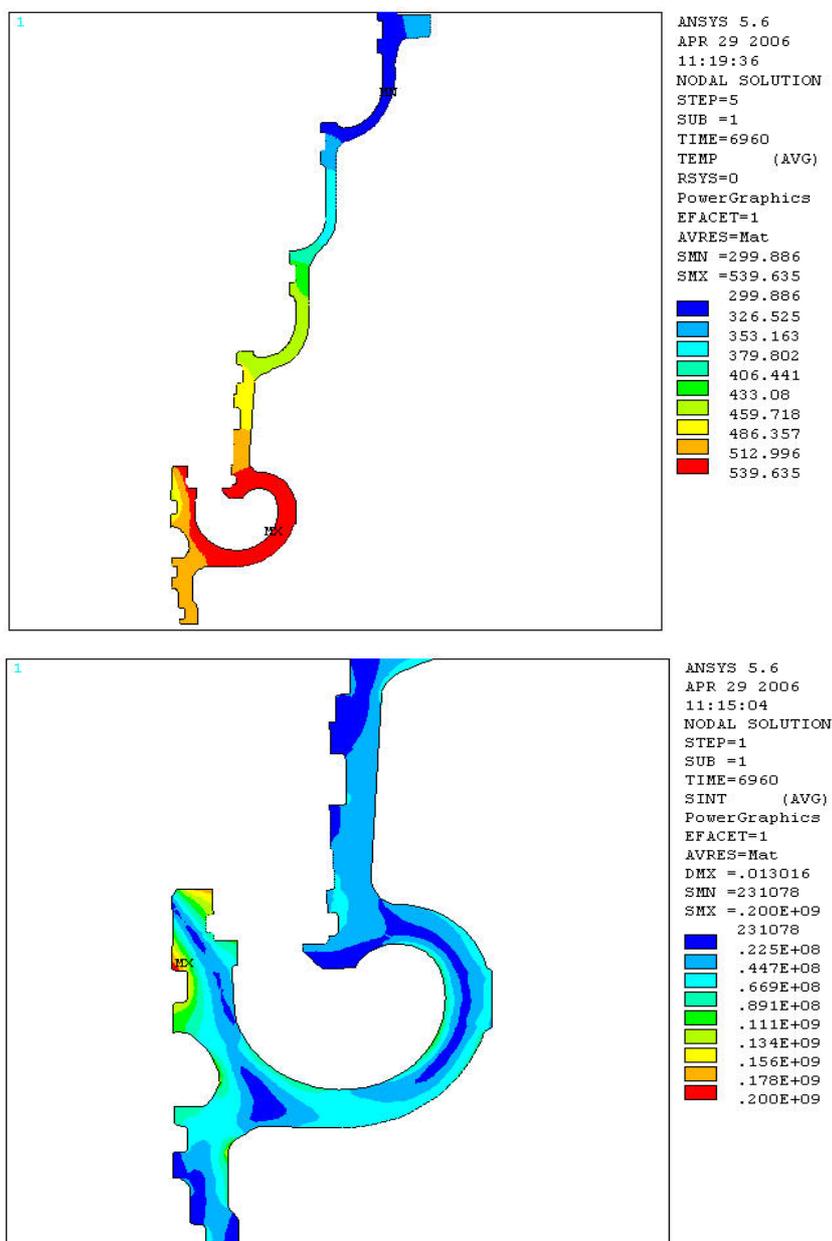


Рис. 2. ТС и НДС корпуса ЦСД при пуске НС-2 ( $N_3 = 200$  МВт)

Моделирование ТС и НДС автоматического стопорного клапана (АСК) ЦВД и автоматического защитного клапана (АЗК) ЦСД производили в трехмерной постановке с применением SOLID WOKRS для пространственного представления АСК и АЗК в конечно-элементном виде. Начальное температурное распределение определяется результатом решения стационарной задачи теплопроводности.

Максимальные напряжения возникают при пусках их ХС и НС-2, достигают 192 МПа в конце этапа нагружения при пуске из НС-2 (рис. 3) и 200 МПа в начале нагружения при пуске из ХС. При этом в кольцевом сечении седла клапана имеют место значительные напряжения (240 МПа), что определяется конструкцией клапана и особенностями течения. Так же значительные напряжения возникают в подфланцевой зоне клапана.

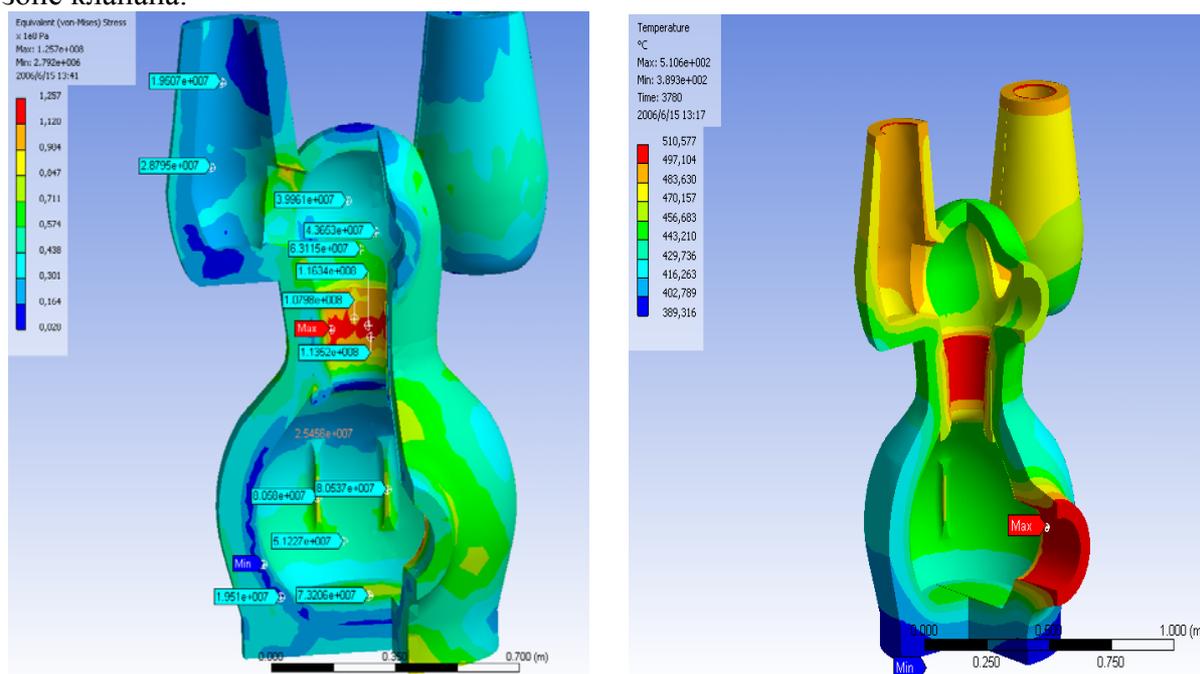


Рис. 3. ТС и НДС АСК ЦВД при пуске НС-2 ( $N_s = 100$  МВт)

При резких изменениях температуры свежего пара в процессе нагружения турбины, а также в предтолчковом прогреве, когда при конденсации пара на внутренней поверхности металла клапана возникает температурный удар, напряжения могут вызвать развитие и углубление литейных дефектов металла клапана и привести к возникновению и развитию трещин. Максимальные напряжения для АЗК ЦСД возникают при пусках их ХС и НС-2, но не превышают 100 МПа. Максимум напряжений смещается в область высоких давлений, что соответствует конечным этапам пуска.

Для определения малоциклового долговечности корпусных деталей использовались данные по упругим напряжениям, полученные в результате расчетов НДС турбины К-200-130, в соответствии с рекомендациями РТМ [9]. Результаты представлены в таблицах 1-5.

Максимальная разность температур по радиусу ротора РСД при пуске по типу НС-2 переместилась из зоны у основания диска регулирующей ступени в зону подачи пара на каминные уплотнения. Там же появляются максимальные напряжения.

**Таблица 1. Результаты расчетной оценки малоциклового усталости РВД турбины**

Режимы пуска	Температура пара на ПКУ, °С	Радиальная разность температур $\Delta t_{\text{макс}}$ , °С		Амплитуда интенсивности напряжений $\sigma_{ia}$ , МПа	Приведенная интенсивность деформации $\epsilon_{\text{апр}}$ , %	Допустимое число циклов $N_{\text{доп}}$
		разворот	нагрузе			
НС-2	490/140	147	-72	257	0,12	3000
НС-1	250/140	-	65	145	0,093	6000
ХС	250/140	-	72	179	0,109	4500

**Таблица 2. Результаты расчетной оценки малоциклового усталости РСД турбины**

Режимы пуска	Температура пара на ПКУ, °С	Радиальная разность температур $\Delta t_{\text{макс}}$ , °С		Амплитуда интенсивности напряжений $\sigma_{ia}$ , МПа	Приведенная интенсивность деформации $\epsilon_{\text{апр}}$ , %	Допустимое число циклов $N_{\text{доп}}$	
		развороте	нагрузе			$n_N=5$ $n_E=1,5$	$n_N=3$ $n_E=1,25$
НС-2	490/140	-29	34	208,5	0,1	5000	10000
НС-1	250/140	-	58	197	0,116	3500	5830
ХС	250/140	-	81	253	0,144	1250	2080

Результаты расчетов на малоцикловую усталость металла корпуса ЦВД при различных пусковых режимах представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты расчетов на малоцикловую усталость металла корпуса ЦВД турбины**

Режимы пуска	Разность температур по толщине стенки $\Delta t_{\text{макс}}$ , °С		Амплитуда интенсивностей напряжений $\sigma_{ia}$ , МПа	Приведенная амплитуда интенсивностей деформации $\epsilon_{\text{апр}}$ , МПа	Допускаемое число циклов $N_{\text{доп}}$
	При развороте $\Delta t_1$ , °С	При нагружении $\Delta t_{\text{макс}}$ , °С			
НС-2	-4	12	73	0,05	$200 \cdot 10^3$
НС-1	-	68	215	0,12	8000
ХС	72	60	285	1,156	2400

Так как амплитуда интенсивности условно-упругих напряжений и, соответственно, деформаций в металле корпуса ЦСД при рассмотренных режимах пуска турбины сравнительно невелики (от  $\sigma_{ia} = 69$  до 121 МПа,  $\epsilon_{\text{апр}} = 0,053$  % и 0,072 %), то допустимое число циклов для указанных режимов пуска меняется от  $N_d = 40 \cdot 10^3$  для пусков типа ХС до  $100 \cdot 10^3$  для пусков НС-1 и НС-2. Другими словами, с точки зрения малоциклового усталостной прочности металл корпуса ЦСД турбины ограничений на обозримый срок эксплуатации не имеет. Однако, учитывая большую наработку и старение металла при проведении капитальных ремонтов турбины корпуса ЦСД и ЦВД должны подвергаться тщательному осмотру и проверке на возможное появление трещин в соответствии с разработанным регламентом.

Поверочный расчет на малоцикловую усталость АСК ЦВД, АЗК ЦСД и регулирующих клапанов турбины К-200-130-3 выполнен на основании анализа действующих нагрузок и температурных полей в клапанах ЦВД и ЦСД турбины при типичных пусковых режимах, а также полученных максимальных и минимальных значений интенсивностей напряжений при стационарных и переходных режимах работы турбоустановки.

Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния корпусов СК и РК ЦВД и ЦСД представлены в табл. 4-5. Для АСК ЦВД температура стенки клапана, интенсивности напряжений и деформаций представлены в таблице 4.

**Таблица 4. Температура стенки, интенсивности напряжений и деформаций в корпусе АСК ЦВД**

АСК ЦВД	Температура стенки клапана $t_{\max}$ , °С	Интенсивность напряжений, $\sigma_i$ , МПа	Приведенная деформация, $\varepsilon_{a\text{ пр}}$ , %	Допускаемое число пусков, $N_d$
				$n_N = 5, n_E = 1,5$
НС-2	500	192,0	0,071	5000
НС-1	497	170,0	0,066	8000
ХС	489	200,0	0,0735	5800
Тепловой удар	500	538	0,197	1700

Для стопорного клапана ЦСД (АЗК ЦСД) температура стенки клапана, интенсивности напряжений и деформаций представлены в таблице 5.

**Таблица 5. Температура стенки, интенсивности напряжений и деформаций в корпусе АЗК ЦСД**

АЗК ЦСД	Температура стенки клапана $t_{\max}$ , °С	Интенсивность напряжений, $\sigma_i$ , МПа	Приведенная деформация, $\varepsilon_{a\text{ пр}}$ , %	Допускаемое число пусков, $N_d$
				$n_N = 5, n_E = 1,5$
НС-2	500	96,82	0,0355	10000
НС-1	480	90,0	0,033	20000
ХС	460	96,63	0,03548	10200

При тепловом ударе (заброс конденсата и др.) температурные напряжения в стенке клапана в местах конденсатных пятен максимальны и могут достигать 350 МПа и более. Тогда допускаемое число пусков до появления трещин снизится по сравнению с табличными значениями до  $N_d^{\text{АЗК ЦСД}} = 2600$  при  $\varepsilon_{a\text{ пр}} = 0,128$  %.

В случае тепловых ударов на начальных этапах пусков, а также при попадании влаги в горячий клапан возможно повышение напряжений до 570-610 МПа. В этом случае допустимое число циклов резко падает и может составить величину порядка 1800.

### **Выводы**

1. В результате проведенного исследования получены данные, позволяющие оценить индивидуальный ресурс роторов, корпусов и клапанов ЦВД и ЦСД турбины К-200-130 на основе расчета теплового и напряженно-деформированного состояния при трех основных эксплуатационных режимах (НС-1, НС-2, ХС).

2. Расчеты на малоцикловую усталость металла роторов, корпусов ЦВД и ЦСД, а также АСК ЦВД и АЗК ЦСД турбины К-200-130 показали, что минимальный ресурс для приведенной в статье турбины К-200-130-3 имеет ротор цилиндра среднего давления (1250 циклов).

3. Для повышения надежности элементов турбины, уменьшения тепловых нагрузок и улучшения качества эксплуатации необходимо провести минимальную модернизацию системы контроля основных параметров турбины с регистрацией параметров, влияющих на надежность турбины; внедрить современные системы мониторинга виброактивности турбоагрегатов с диагностикой состояния элементов валопровода, в том числе и на наличие трещин в роторе; внедрить системы контроля и технической диагностики теплового и напряженно-деформированного состояния

роторов высокого и среднего давления, а также корпусов ЦВД и ЦСД, АСК ЦВД, АЗК ЦСД, основанные на сочетании механики разрушений, металловедения и неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования.

4. Продление эксплуатации високотемпературного энергетического оборудования требует новых подходов к выбору коэффициентов запаса прочности по числу циклов и по деформациям на основе детального исследования прочностных свойств сталей, применяемых в паровых турбинах.

#### Литература

1. *Иванов В. А.* Проблема покрытия переменной части графиков энергопотребления // Теплоэнергетика. – 1983. – №6. – с. 2-6.

2. *Лейзерович А. Ш.* Продление срока службы паровых турбин // Энергохозяйство за рубежом. – 1985. – № 1. – с. 5-8.

3. *Плоткин Е. Р., Лейзерович А. Ш.* Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков. – М.: Энергия, 1980. – 187 с.

4. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / *А. А. Дубов* // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – с. 54-57.

5. Проблема продления ресурса теплоэнергетического оборудования ТЭС / *А. Б. Попков и др.* // Теплоэнергетика. – 2003. – № 4. – с. 29-36.

6. 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.

7. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М., 2003.

8. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – М., 1985. – № АЗ-002/7382. – 49 с.

9. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. – М., 1973. – № ВК-002/3209. – 104 с.

© Черноусенко О.Ю., 2007