

УДК 621.165.62-192

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИТЫХ КОРПУСОВ РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ МОЩНОСТЬЮ 200 МВт

О. Ю. Черноусенко,

д-р техн. наук

chernousenko20a@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1427-8068

Д. В. Рындюк,

канд. техн. наук

rel_dv@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7770-7547

В. А. Пешко,

канд. техн. наук

vapeshko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0610-1403

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

В нормативных документах Министерства энергетики и угольной промышленности Украины парковый ресурс высокотемпературного энергетического оборудования энергоблоков 200 МВт ограничен наработкой 220 тыс. ч и числом пусков 800. На сегодняшний день высокотемпературные литые корпуса регулирующих клапанов цилиндров высокого и среднего давления паровых турбин мощностью 200 МВт энергоблоков ДТЭК Луганская ТЭС отработали порядка 305–330 тыс. ч при общем количестве пусков от 1438 до 1704, что превысило парковые характеристики. Поэтому необходимо провести оценку остаточного ресурса корпусов регулирующих клапанов цилиндров высокого и среднего давления паровой турбины К-200-130, чтобы определить возможность их дальнейшей эксплуатации. Данные расчеты выполнены на базе исследований теплового и напряженно-деформированного состояния литого оборудования турбины, проведенных авторами ранее. В работе установлены значения приведенных к симметричному циклу нагружения амплитуд интенсивности деформаций для наиболее типовых переменных режимов работы. Используя экспериментальные кривые малоциклового усталости стали 15Х1М1ФЛ, были установлены значения допустимого числа пусков и накопленная в основном металле циклическая поврежденность. Значение накопленной в ходе стационарных режимов работы статической поврежденности определялось согласно полученным авторами ранее экспериментальным данным о длительной прочности стали 15Х1М1ФЛ. Проведенные расчеты показали, что суммарная поврежденность корпусов регулирующих клапанов паровой турбины К-200-130 блока № 15 ДТЭК Луганская ТЭС составляет 97 и 98%. Остаточный ресурс металла регулирующих клапанов цилиндров высокого давления практически исчерпан и равен 10 тыс. ч. Остаточная наработка регулирующих клапанов цилиндров среднего давления составляет 7 тыс. ч, т.е. также практически исчерпана, при коэффициентах запаса прочности по количеству циклов и по деформациям на уровне 5 и 1,5, соответственно, а также допустимом времени работы металла 370 тыс. ч. При увеличении допустимого времени работы металла до 470 тыс. ч согласно экспериментальным исследованиям КПИ им. Игоря Сикорского суммарная поврежденность металла корпусов клапанов снижается до 80 %, а остаточный ресурс металла увеличивается до 79 и 75 тыс. ч часов для клапанов цилиндров высокого и среднего давления соответственно.

Ключевые слова: остаточный ресурс, длительная прочность, малоцикловая усталость, запас прочности, регулирующий клапан, литой корпус, паровая турбина.

Введение

Согласно нормативным документам Министерства энергетики и угольной промышленности Украины парковый ресурс высокотемпературного энергетического оборудования энергоблоков 200 МВт ограничен наработкой 220 тыс. ч и числом пусков 800 [1]. На сегодняшний день высокотемпературные литые корпуса регулирующих клапанов цилиндров высокого (РК ЦВД) и среднего давления (РК ЦСД) паровых турбин К-200-130 энергоблоков ДТЭК Луганская ТЭС отработали порядка 305–330 тыс. ч при общем количестве пусков от 1438 до 1704, что превысило парковые характеристики. Значительное превышение проектных ресурсных показателей несет в себе опасность аварийного выхода из строя оборудования с серьезными материальными затратами [2].

Существенная нехватка маневренных мощностей в Объединённой энергосистеме Украины приводит к частому привлечению энергоблоков 200 МВт к регулированию генерации электроэнергии.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© О. Ю. Черноусенко, Д. В. Рындюк, В. А. Пешко, 2020

В то же время проведенные исследования [3] показывают прямую зависимость количества эксплуатационных отказов парораспределительных органов турбин и количества переменных режимов работы.

Выполненные исследования [4] установили наиболее нагруженные зоны регулирующих клапанов паровых турбин, в которых возникают растрескивания и образуются усталостные трещины. Ими являются радиусные скругления и переходы между паровпускными или выхлопными патрубками и паровым коробом, области, примыкающие к ребрам жесткости внутри парового короба, а также зоны посадки седла клапана. В данных областях возникают наибольшие напряжения при проведении численных экспериментов по исследованию термонапряженного состояния. Вместе с тем установлено, что для определенных эксплуатационных режимов данные напряжения могут превышать предел ползучести стали клапана при расчетной температуре металла [5].

Проведенное расчетное исследование ресурсных показателей стопорных и защитных клапанов паровой турбины К-200-130 показали существенное влияние на долговечность их работы не только статических, но и циклических механизмов разрушения [6].

С учетом отмеченного выше задача оценки остаточного ресурса корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 является актуальной и обязательной к решению при обосновании возможности дальнейшей эксплуатации данного оборудования.

Цель и задачи исследования

Целью работы является расчетная оценка ресурсных показателей и обоснование допустимости продления эксплуатации РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 блока № 15 ДТЭК Луганская ТЭС.

Для достижения поставленной цели мы провели:

- расчет амплитуд интенсивности деформаций в литых регулирующих клапанах и допустимого числа циклов для наиболее типичных режимов работы энергоблока 200 МВт;
- оценку сопротивляемости основного металла клапанов к исчерпанию длительной прочности и расчет статической поврежденности корпусов для стационарных режимов работы;
- расчетную оценку остаточного ресурса корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 и обоснование возможности продления их эксплуатации.

Оценка малоциклового усталости РК ЦВД и РК ЦСД паровой турбины К-200-130 блока № 15 ДТЭК Луганская ТЭС

Поверочный расчет на малоцикловую усталость РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 выполнен на основании анализа действующих нагрузок и температурных полей при типичных пусковых режимах, полученных авторами ранее [7]. Учтены полученные максимальные и минимальные значения интенсивностей напряжений при стационарных и переходных режимах работы турбины. Повреждаемость корпусов РК ЦВД и РК ЦСД учтена согласно данным визуального осмотра, травления, магнитопорошковой диагностики и определения механических свойств металла. Расчеты выполнялись по амплитудам упругих деформаций, так как значения интенсивностей упругих деформаций удовлетворяли условию [8]. Методика проведения расчета на малоцикловую усталость, а также математическая модель расчета ресурсных показателей паротурбинного оборудования представлена в [9].

При выполнении расчета на малоцикловую усталость корпуса РК ЦВД (рис. 1) турбины К-200-130-3 рассматривались характерные контрольные точки (рис. 1, а), в которых определялись размахи интенсивностей условных упругих напряжений за все периоды пусков из различных тепловых состояний (рис. 1, б, 2). Максимальные интенсивности напряжений при пуске из горячего состояния наблюдаются в паровом коробе в момент толчка роторов (расчетное время $\tau=920$ с) и составляют 100 МПа. В остальные же моменты времени значения напряжений не превышают 90 МПа.

При пуске из холодного состояния (рис. 2) максимальная интенсивность напряжений $\sigma_r=120$ МПа наблюдается в горле седла РК ЦВД спустя 5 минут с начала предварительного прогрева паропроводов (расчетное время $\tau=300$ с). С выходом на номинальный режим работы все напряжения в исследуемых областях приобретают растягивающую природу и составляют 35–70 МПа.

Аналогичные исследования были выполнены и для РК ЦСД (рис. 3, 4). Максимальные интенсивности напряжений при пуске из горячего состояния имеют место в момент времени 2400 с (нагружение турбины до 100 МВт электрической мощности) и составляют 152 МПа в области сварного шва паровпускного патрубка и парового короба. Также высокие напряжения наблюдаются в этот же момент в области паровпускного патрубка со стороны автоматического защитного клапана, которые составляют 102 МПа (рис. 3, б).

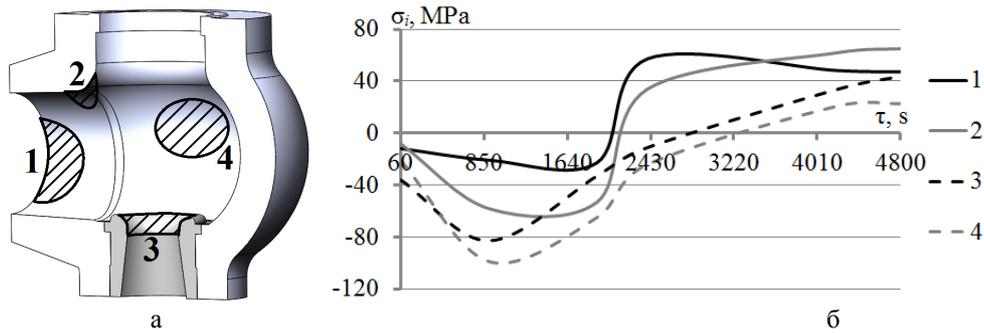


Рис. 1. Динамика изменения интенсивности напряжений в РК ЦВД при пуске из горячего состояния:
а – характерные области исследования (1 – область паровпускного патрубка, 2 – радиусный переход от паровпускного патрубка к паровому корпусу, 3 – горло седла клапана, 4 – паровой корпус); б – интенсивности напряжений во времени

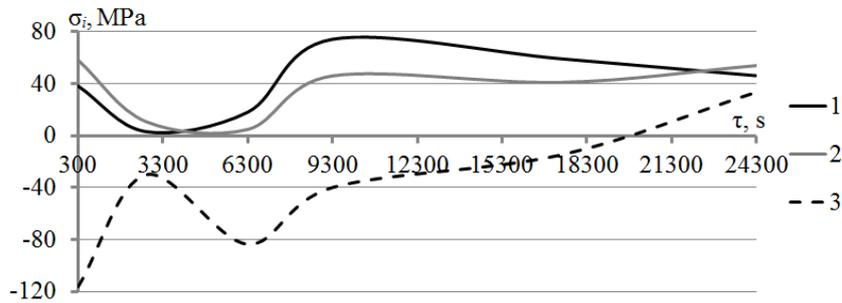


Рис. 2. Динамика изменения интенсивности напряжений в РК ЦВД при пуске из холодного состояния

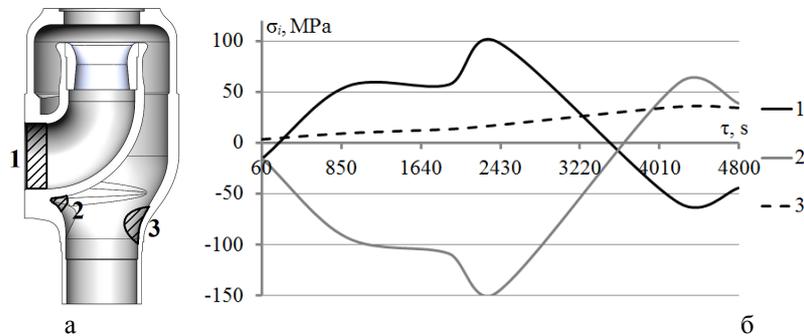


Рис. 3. Динамика изменения интенсивности напряжений в РК ЦВД при пуске из горячего состояния:
а – характерные области исследования (1 – область паровпускного патрубка, 2 – зона сварного шва паровпускного патрубка и парового корпуса, 3 – область парового корпуса у выхлопного патрубка);
б – интенсивности напряжений во времени

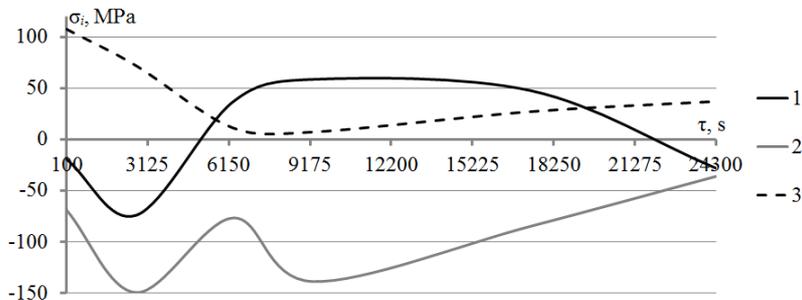


Рис. 4. Динамика изменения интенсивности напряжений в РК ЦВД при пуске из холодного состояния

При пуске из холодного состояния (рис. 4) наиболее нагруженными моментами времени для РК ЦСД являются $\tau=100$ с (спустя 2 минуты после начала прогрева паропроводов), $\tau=2700$ с (толчок роторов) и $\tau=9300$ с (начало нагружения турбины после синхронизации с электросетью). Значения максимальных напряжений в эти моменты времени составляют 103, 150 и 139 МПа соответственно.

Поскольку максимальные интенсивности напряжений для всех исследованных режимов не превышали предел текучести стали 15X1M1ФЛ при температуре 540 °С, который равен 168 МПа, задача пластичности не рассматривалась. Стоит также отметить, что невысокий уровень напряжений объясняется технологией пуска на энергоблоке № 15 Луганской ТЭС, согласно которой все пусковые режимы выполняются при полностью открытых РК, кроме пуска из горячего состояния, во время которого РК ЦСД изменяет своё проходное сечение (клапан ЦВД – открыт полностью).

Полученная динамика изменения интенсивности напряжений позволяет установить значение амплитуды интенсивности деформации и привести её к симметричному циклу нагружения с использованием метода Нойбера [8].

Допустимое число циклов для каждого пускового режима определялось по экспериментальным кривым малоциклового усталости стали 15X1M1ФЛ для расчетной температуры (табл. 1, 2).

Для РК ЦВД (табл. 1) приведенная к симметричному циклу нагружения амплитуда интенсивности деформаций для рассмотренных пусковых режимов составляет 0,032–0,037%, что соответствует допустимому числу циклов до разрушения больше 10000. Данное обстоятельство свидетельствует о незначительном влиянии малоциклового усталости на поврежденность литых РК ЦВД, что связано с благоприятными условиями технологии пуска на данной ТЭС.

При проведении расчетной оценки малоциклового усталости металла корпуса РК ЦСД турбины К-200-130 (табл. 2) максимальная температура стенки клапана не превышала 536–540 °С. Невысокий уровень приведенной деформации при пуске из холодного состояния (0,048%), также определяет допустимое число циклов более 10000. Лишь при пуске из горячего состояния, благодаря высокому уровню амплитуды напряжений (103 МПа), значение амплитуды деформации оказывается 0,069%. Допустимое число пусков из ГС для РК ЦСД составляет 9300.

Таблица 1. Расчетная оценка малоциклового усталости металла корпуса РК ЦВД

Тип пуска	Расчетная температура t_{\max} , °С	Амплитуда интенсивности напряжений в цикле σ_a , МПа	Приведенная деформация $\epsilon_{a\text{пр}}$, %	Допустимое число пусков N_d при запасах прочности $n_N=5$, $n_\epsilon=1,5$
ГС	538	63,50	0,0315	$>1 \cdot 10^4$
ХС	536	74,45	0,0369	$>1 \cdot 10^4$

Таблица 2. Расчетная оценка малоциклового усталости металла корпуса РК ЦСД

Тип пуска	Расчетная температура t_{\max} , °С	Амплитуда интенсивности напряжений в цикле σ_a , МПа	Приведенная деформация $\epsilon_{a\text{пр}}$, %	Допустимое число пусков N_d при запасах прочности $n_N=5$, $n_\epsilon=1,5$
ГС	540	103,0	0,0692	9300
ХС	536	74,9	0,0484	$>1 \cdot 10^4$

Расчет ресурсных показателей РК ЦВД и РК ЦСД паровой турбины К-200-130 блока № 15 ДТЭК Луганская ТЭС и обоснование возможности продления их эксплуатации

С учетом данных по интенсивностям условных упругих напряжений при пусках из различных тепловых состояний, а также оценки малоциклового усталости металла корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 расчетная оценка их поврежденности и индивидуальных остаточных ресурсов представлена в табл. 3. По данным эксплуатирующей организации общее количество пусков равно 1438 и общая наработка энергоблока за весь период эксплуатации 305303 ч. Коэффициенты запаса прочности по количеству циклов $n_N=5$ и по деформациям $n_\epsilon=1,5$ принимались согласно рекомендациям [8]. В результате расчетов циклическая поврежденность литого корпуса РК ЦВД составила 14,4%, а литого корпуса РК ЦСД – 15,3%.

В отношении статической поврежденности следует отметить, что для металла РК он составляет 82,5% в случае, когда допускаемое время работы металла корпусов принято 370 тыс. ч. При допускаемом времени работы металла 470 тыс. ч согласно данным работы [6] статическая поврежденность литых корпусов РК ЦВД и РК ЦСД уменьшилась до 65%.

Таким образом, суммарная поврежденность металла корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 составляет 97 и 98 % при допускаемом времени работы металла 370 тыс. ч, а остаточный ресурс является практически полностью исчерпанным, что не допускает возможность продления эксплуатации данного оборудования.

При расчете допускаемого времени работы металла, с использованием экспериментальных кривых длительной прочности стали 15X1M1ФЛ [6], суммарная поврежденность металла корпусов клапанов снижается до 79 и 80%, а остаточный ресурс равен 79510 и 75200 ч для РК ЦВД и ЦСД соответственно.

Таблица 3. Расчетная оценка ресурсных показателей корпусов РК ЦВД, РК ЦСД паровой турбины К-200-130 блока № 15 ДТЭК Луганская ТЭС

Наименование	Формула	Корпус РК ЦВД		Корпус РК ЦСД	
Общее число пусков	$n_{\text{общ}}$	1438		1438	
Общая наработка	$\tau_{\text{общ}}, \text{ч}$	305303		305303	
Коэффициенты запаса прочности по количеству циклов/по деформациям	n_N/n_ϵ	5 / 1,5		5 / 1,5	
Допускаемое число циклов по различным типам пусков	$N_{\text{ГС}}=935$	>10000		9300	
	$N_{\text{НС}}=259$	>10000		9300	
	$N_{\text{ХС}}=244$	>10000		>10000	
Циклическая поврежденность	$\Pi_{\text{ц}}=\sum n_i/N_{\text{пл}}, \%$	14,4		15,3	
Допускаемое время работы металла	$t_{\text{пл}}, \text{ч}$	$3,7 \times 10^5$	$4,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$4,7 \times 10^5$
Статическая поврежденность	$\Pi_{\text{ст}}=\sum \tau_{\text{общ}}/t_{\text{пл}}, \%$	82,5	65,0	82,5	65,0
Суммарная поврежденность	$\Pi_{\Sigma}=\Pi_{\text{ст}}+\Pi_{\text{ц}}, \%$	96,9	79,4	97,8	80,3
Индивидуальный остаточный ресурс	$T_{\text{ост}}=G \times \tau_r, \text{ч}$	9786	79510	6890	75200

Если экспертная комиссия, состоящая согласно [1] из представителей электрической станции, завода-изготовителя, специализированных и других организаций, может принять допускаемое время работы металла на уровне 470 тыс. ч, то индивидуальный остаточный ресурс металла корпуса РК ЦВД турбины К-200-130 составляет 79510 ч, а корпуса РК ЦСД – 75200 ч. Это позволяет продлить эксплуатацию корпусов РК ЦВД и РК ЦСД на 50 тыс. ч при числе пусков, равном половине паркового количества пусков, т.е. 400 пусков.

Выводы

1. Выполненный расчет на малоцикловую усталость корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 показал, что наибольшая величина амплитуды интенсивности напряжений для РК ЦВД наблюдается при пуске из холодного состояния и составляет 74,5 МПа. Для РК ЦСД наибольшая амплитуда напряжений (103 МПа) характерна для пуска из горячего состояния. Сравнительно небольшое значение амплитуды интенсивности деформаций при пусковых режимах устанавливает высокое допустимое число циклов для РК ЦВД (10000) и РК ЦСД (9300).

2. Суммарная поврежденность, накопленная в основном металле корпусов регулирующих клапанов за 305 тыс. ч эксплуатации, составляет 79,4% для РК ЦВД и 80,3% для РК ЦСД при коэффициентах запаса прочности по числу циклов и по деформациям $n_N=5$ и $n_\epsilon=1,5$, соответственно, а также допустимом времени работы металла 470 тыс. ч.

3. Расчетное значение индивидуального остаточного ресурса литых корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 составляет 79510 и 75200 ч соответственно. Это позволяет продлить эксплуатацию корпусов РК ЦВД и РК ЦСД турбины К-200-130 на 50 тыс. ч при остаточном числе пусков, не превышающем половину их паркового количества.

Литература

1. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. Офіц. вид. К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с.
2. Mirandola A., Stoppato A., Lo Casto E. Evaluation of the effects of the operation strategy of a steam power plant on the residual life of its devices. *Energy*. 2010. Vol. 35. Iss. 2. P. 1024–1032. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.024>.

3. Zhang D., Engeda A., Hardin J., Aungier R. Experimental study of steam turbine control valves. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part C: J. Mech. Eng. Sci.* 2004. Vol. 218. P. 493–507. <https://doi.org/10.1243/095440604323052283>.
4. Temelkoska B. K., Cvetanoski R. K., Srebrenkoska S. S., Mirčeski V. B. Causes for steam turbine control valves fracture. *Tehnika*. 2019. Vol. 74. Iss. 4. P. 539–545. <https://doi.org/10.5937/tehnika1904539T>.
5. Koliadiuk A., Shulzhenko M. Thermal and stress state of the steam turbine control valve casing, with the turbine operation in the stationary modes. *J. Mech. Eng.* 2019. Vol. 22. No. 2. P. 37–44. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.037>.
6. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V. Research on residual service life of automatic locking valve of turbine K-200-130. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5. No. 8(89). P. 39–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112284>.
7. Chernousenko O. Yu., Ryndiuk D. V., Peshko V. A. Thermal and stress-strain state of cast bodies of control valves of 200 MW power units. *J. Mech. Eng.* 2020. Vol. 23. No. 3. P. 8–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.03.008>.
8. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость. М., 1985. № АЗ–002/7382. 49 с.
9. 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». *Вестн. НТУ «ХПИ». Сер.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2017. № 10 (1232). С. 30–37. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.10.04>.

Поступила в редакцию 23.03.2020

Оцінка залишкового ресурсу литих корпусів регулюючих клапанів енергоблоків потужністю 200 МВт

О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк, В. А. Пешко

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

В нормативних документах Міністерства енергетики та вугільної промисловості України парковий ресурс високотемпературного енергетичного обладнання енергоблоків 200 МВт обмежений напрацюванням 220 тис. годин та числом пусків 800. На сьогодні високотемпературні литі корпуси регулюючих клапанів циліндрів високого та середнього тиску парових турбін потужністю 200 МВт енергоблоків ДТЕК Луганська ТЕС відпрацювали близько 305–330 тис. годин за загальною кількістю пусків від 1438 до 1704, що перевищує паркові значення. Тому необхідно провести оцінку залишкового ресурсу корпусів регулюючих клапанів циліндрів високого і середнього тиску парової турбіни К-200-130, щоб визначити можливість її подальшої експлуатації. Дані розрахунки виконані на базі дослідження теплового і напружено-деформованого станів литого устаткування турбіни, що виконані авторами раніше. В роботі встановлено значення приведених до симетричного циклу навантаження амплітуд інтенсивності деформацій для найбільш типових змінних режимів роботи. Використовуючи експериментальні криві малоциклової втоми сталі 15Х1М1ФЛ, були встановлені значення допустимого числа пусків і накопичена в основному металі циклічна пошкоджуваність. Значення накопиченої в ході стаціонарних режимів роботи статична пошкоджуваність визначалась згідно з отриманими авторами раніше експериментальними даними щодо довготривалої міцності сталі 15Х1М1ФЛ. Проведені розрахунки показали, що сумарна пошкоджуваність корпусів регулюючих клапанів парової турбіни К-200-130 блока № 15 ДТЕК Луганська ТЕС складає 97 і 98 %. Залишковий ресурс металу регулюючих клапанів циліндрів високого тиску практично вичерпаний і становить 10 тис. годин. Залишкове напрацювання регулюючих клапанів циліндрів середнього тиску складає 7 тис. годин, тобто також майже вичерпане, за коефіцієнтів запасу міцності за числом циклів і за деформаціями на рівні 5 і 1,5, відповідно, а також допустимого часу роботи металу 370 тис. годин. При збільшенні допустимого часу роботи металу до 470 тис. годин відповідно до експериментальних досліджень КПП ім. Ігоря Сікорського сумарна пошкоджуваність металу корпусів клапанів зменшується до 80 %, а залишковий ресурс збільшується до 79 і 75 тис. годин для клапанів циліндрів високого і середнього тиску відповідно.

Ключові слова: залишковий ресурс, довготривала міцність, малоциклова втома, запас міцності, регулюючий клапан, литий корпус, парова турбіна.