

УДК 621.165.65-192

О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, д-р техн. наук; доц. НТУУ «КПИ», г. Киев
Т.В. НИКУЛЕНКОВА, аспирант НТУУ «КПИ», г. Киев

ПРОДЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН 200 МВт НА БАЗЕ ДИАГРАММЫ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ С НАРАБОТКОЙ СВЕРХ ПАРКОВОГО РЕСУРСА

Проведено розрахункове і експериментальне дослідження довготривалої міцності металу роторної сталі 25Х1М1ФА парових турбін енергоблоків потужністю 200 МВт, що відпрацювали у реальних умовах більше 220 тис. годин. Розрахункове дослідження базується на врахуванні пошкоджуваності по даних не руйнуючого контролю енергетичного обладнання і експериментальних дослідженнях довготривалої міцності реального РСТ. Експериментальне дослідження базується на вивченні пошкоджуваності по даних не руйнуючого контролю енергетичного обладнання і розрахункових дослідженнях залишкового ресурсу високотемпературних елементів парових турбін потужністю 200 МВт.

The settlement and experimental research of long durability of metal rotor's steels 25X1M1FA steam turbines of power units by capacity 200 MWt, the 220 thousand which have fulfilled in actual practice more than is spent. Races-even research it is based on the account of damaged according to not destroying control of the power equipment to experimental researches of long durability real rotor. Experimental research is based on studying of damaged according to not destroying control of the power equipment and to settlement researches of a residual resource of high-temperature elements of steam turbines by capacity 200 MWt.

Введение

Современное состояние ТЭС Украины следует рассматривать как критическое. Паровые турбины мощностью 200 МВт, установленные на ТЭС Украины, часто работают в переменной части графика электрических нагрузок, а также в режиме частых пусков и остановов. Это обусловлено тем, что маневренные возможности находящихся в эксплуатации конденсационных агрегатов исчерпаны и недостаточны для покрытия переменной части графика электрических нагрузок.

При прогнозировании остаточного ресурса роторы паровых турбин являются ответственными элементами, определяющими ресурс. Условия их эксплуатации – высокий уровень температур и напряжений, обуславливают характер протекания процессов ползучести и малоциклового усталости. Кроме того, происходят необратимые изменения роторной стали 25Х1М1ФА, отработавшей в реальных условиях более 220 тыс. ч., которые позволяют определить значения номинальных допустимых напряжений для соответствующего заданного ресурса.

Для продления эксплуатации энергоблоков 200 МВт определяют остаточный ресурс роторов паровых турбин на основе отраслевого стандарта [1]. Основная сложность продления срока эксплуатации роторов заключается в отсутствии экспериментальных данных о длительной прочности для роторной стали 25Х1М1ФА, отработавшей в реальных условиях более 220 тыс. ч. Поэтому, единственным достоверным критерием уточнения коэффициентов запаса прочности по напряжениям и деформациям для металла, отработавшего парковый ресурс, может быть экспериментальное исследование состояния роторной стали.

Целью работы было расчетное и экспериментальное исследование длительной прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации с целью уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов цилиндров ЦСД паровой турбины К-200-130.

Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния ротора паровой турбины К-200-130 при оценке длительной прочности.

Расчетное исследование проводилось для наиболее нагруженных участков роторов паровой турбины К-200-130 в соответствующих зонах проточных частей турбоустановки. Наиболее высокий уровень температурных суммарных напряжений в роторах ЦВД и ЦСД при пусковых режимах у корневой части дисков регулирующей и 13-й ступеней, на ободе дисков в зоне хвостовиков лопаток, в зоне диафрагменных уплотнений последующих ступеней, а также в зоне тепловых канавок передних концевых уплотнений роторов. Здесь, в условиях максимальных напряжений и температур, наиболее интенсивно протекают процессы ползучести и микроразрушения металла.

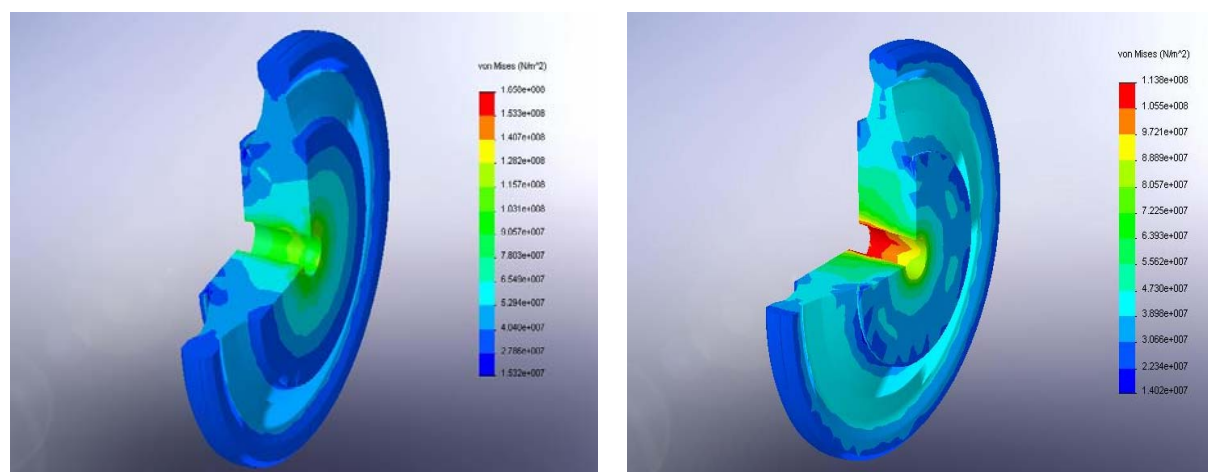
Опыт длительной эксплуатации роторов показывает, что предлагаемые в [2] нормы коэффициента запаса по длительной прочности являются завышенными. По действующему руководящему техническому материалу РТМ [2] коэффициент запаса по длительной прочности равен 1,6, а окружная деформация ползучести на расточке ротора не превышает 0,5 % при гарантированном ресурсе ротора 200 тыс. ч. Регламентирование деформации ползучести предполагает её периодический замер в процессе эксплуатации. НТУУ «КПИ» совместно с ИПП НАНУ [3] были проведены экспериментальные исследования по влиянию старения на изменение физико-механических свойств конструкционных легированных сталей при эксплуатационных температурах с целью уточнения запасов прочности металла РВД и РСД по деформациям. Согласно данным работы [3] анализ реального состояния стали 25Х1М1ФА показал, что по деформациям допустимый предел снижения циклической прочности имеет место в диапазоне амплитуд деформации от 0,0 % до 0,493 %. Следовательно, для этой стали в указанном диапазоне амплитуд напряжений коэффициент запаса прочности по деформации может быть установлен на уровне $n_\epsilon = 1,25$.

Термоупругие расчеты напряженно-деформированного состояния РСД паровой турбины К-200-130 показали, что определяющим остаточный ресурс элементом является 13-я ступень РСД в зонах осевого канала и придисковых галтелей.

На рис. 1 приведено напряженно-деформированное состояние 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 в начальный момент времени (1000 сек) и в конце расчетного периода (10^7 сек). При расчетах находили главные напряжения, интенсивности напряжений на протяжении всего срока, соответствующего стационарным эксплуатационным режимам во всех точках разбивки.

Из приведенных расчетов следует, что местные эквивалентные напряжения в начальный период времени максимальны в зоне осевой расточки ротора в области 13-ой ступени и составляют 165,8 МПа (рис. 1а). Через 100 тыс. часов с начала эксплуатации в результате ползучести местные эквивалентные напряжения уменьшаются и составляют 113,8 МПа в зоне осевого канала (рис. 1б).

Местное эквивалентное напряжение 13-ой ступени РСД паровой турбины К-200-130 на осевой расточке уменьшается до 128 МПа, а изменение напряжений в роторе соответственно приводит к увеличению перемещений. В начальный момент времени перемещения находятся на уровне 0,05 мм, а с течением времени (момент времени $9,9 \cdot 10^6$ сек) увеличиваются до 0,55–0,75 мм. Перемещения максимальны в зоне осевого канала 13-ой ступени РСД паровой турбины К-200-130, что подтверждают данные экспериментальных исследований.



а) начальный момент 1000 сек
 б) конечный момент 10^7 сек
 Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние 13-ой ступени РСД турбины К-200-130

Необходимо иметь в виду, что определение остаточного ресурса роторов выполняется согласно оценке кратковременной статической прочности роторов по максимальному значению номинального эквивалентного напряжения σ_e [4], а также по номинальным напряжениям от центробежных сил (ЦБС) без учета температурных напряжений и их концентрации.

Расчетная оценка поврежденности и остаточного ресурса ротора паровой турбины К-200-130

Величина расчетного остаточного ресурса представляет собой разность между расчетным ресурсом и наработкой детали на момент проведения работ по продлению срока службы [5]. Производится оценка накопленной поврежденности и расчетного ресурса ротора по стадии зарождения трещины.

Продление ресурса паровых турбин согласно методике, регламентируемой нормативным документом РД [4], базируется на определении эквивалентных местных напряжениях ползучести $(\sigma'_{sj})_{\max}$ по программным комплексам *ANSYS* и времени до наступления предельного состояния под действием эквивалентных напряжений $(\sigma'_{sj})_{\max}$ при температурах T'_j , определяемом с помощью диаграммы длительной прочности материала [10]. При определении остаточного ресурса роторов необходимо учитывать, что диаграмма длительной прочности материала ограничивается 170 тыс. ч. эксплуатации.

Было проведено экспериментальное исследование по определению длительной прочности, деградации статической и циклической прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации с целью определения возможности продления эксплуатации сверх паркового ресурса роторов (220 тыс. часов). Для образцов металла РСД, отработавшего более 275 тыс. часов, получена диаграмма длительной прочности роторной стали 25X1M1ФА. С помощью экспериментально полученной диаграммы длительной прочности материала определено время до наступления предельного состояния, которое равно 370 тыс. ч. Реальные значения повреждаемости могут иметь тенденцию к снижению при наработке оборудования более 200 тыс. часов, когда имеет место некоторая деградация свойств металла.

Оценка напряженно-деформированного состояния показала, что максимальные эквивалентные местные напряжения ползучести, рассчитанные по программным

комплексам *ANSYS*, находятся в диапазоне 126–135 МПа. Время до наступления предельного состояния под действием таких эквивалентных напряжений, определяемое с помощью диаграммы длительной прочности материала [10], равно 350 тыс. ч.

Расчетная оценка поврежденности, остаточной допускаемой наработки в годах и индивидуального ресурса ротора РСД согласно рекомендациям [4] для энергоблоков ТЭС представлена на рис. 2.

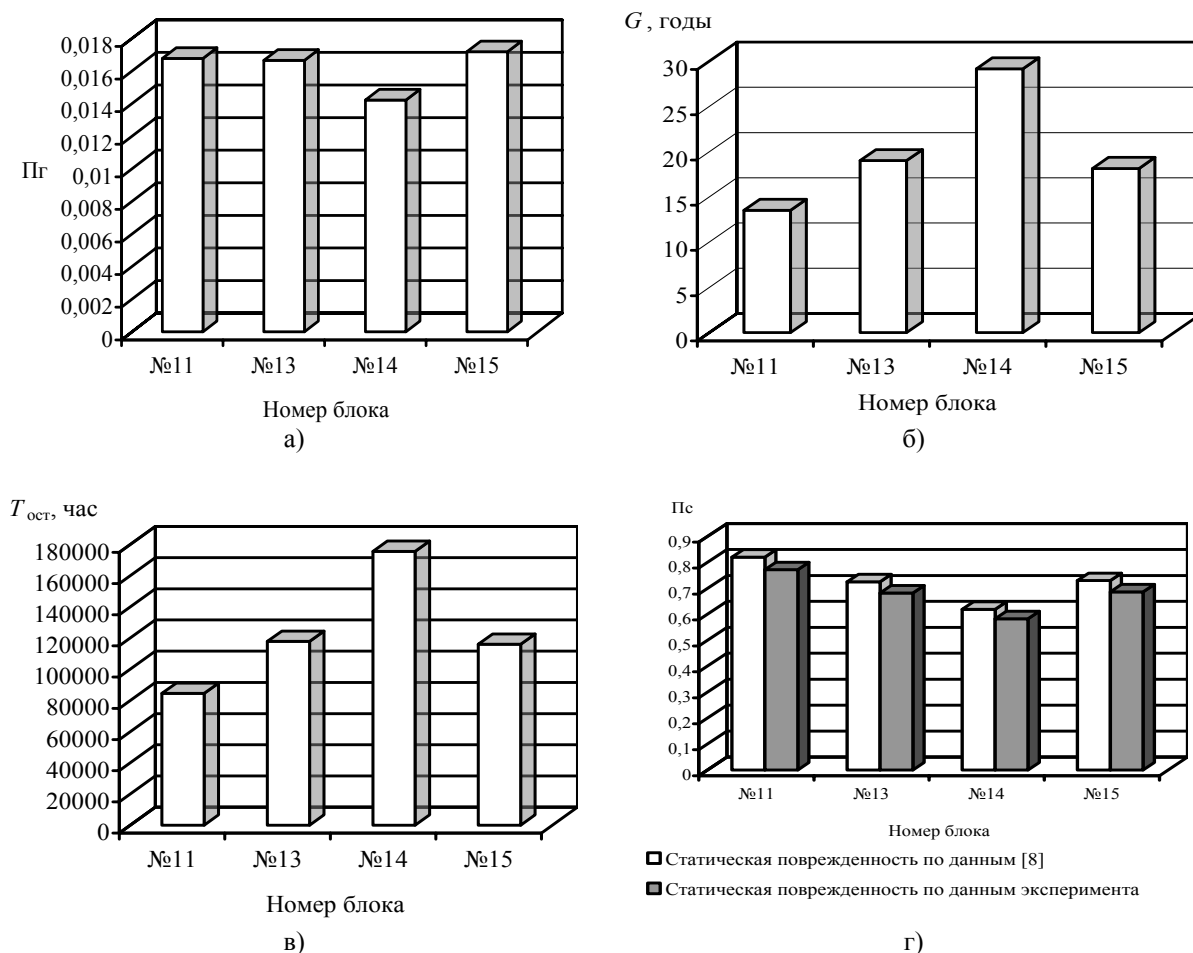


Рис. 2. Расчетная оценка годовой поврежденности (а), остаточной допускаемой наработки (б), индивидуального ресурса (в) и статической поврежденности (г) роторов РСД энергоблоков ТЭС

Расчетная оценка статической поврежденности РСД энергоблоков находится в диапазоне 0,8208–0,6200, когда время до наступления предельного состояния под действием эквивалентных напряжений определяется с помощью диаграммы длительной прочности материала [10], а с учетом данных эксперимента лежит в диапазоне 0,7723–0,5833. Полученная расчетная оценка поврежденности, остаточной наработки в годах и остаточного ресурса может рассматриваться как максимально низкий прогноз индивидуального ресурса для элементов паровой турбины К-200-130 энергоблоков ТЭС, поэтому срок эксплуатации роторов среднего давления можно установить на уровне до 370 тыс. ч.

Выводы по состоянию роторов паровой турбины К-200-130 и постановка задачи экспериментального исследования стали 25Х1М1ФА

Массивные высокотемпературные детали турбин, такие как ротора, обладают сложной геометрией. Поэтому расчет полного температурного поля ротора представляет собой весьма сложную проблему, требующую решения трехмерной задачи нестационарной теплопроводности, при переменных во времени и пространстве ГУ.

В условиях эксплуатации материал РВД и РСД в области конструктивных концентраторов напряжений подвергается статическому и циклическому деформированию в широком диапазоне изменения деформаций и напряжений, поэтому надежность роторов и турбины в целом может ограничиваться исчерпанием ресурса вследствие усталости и ползучести.

Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния роторов ЦВД и ЦСД, проведенное в трехмерной постановке с учетом разгрузочных отверстий, показало, что наиболее нагруженными на переменных режимах работы являются придисковая галтель за 13-й ступенью ротора ЦСД, обод диска 13-ой ступени и вал в зоне передних концевых уплотнений. По результатам расчетных исследований роторы ЦСД имеют более высокий уровень пусковых напряжений, чем роторы ЦВД [7–9]. Это обусловлено тем, что, во-первых, металл РСД в зоне паровпуска и передних концевых уплотнений омывается паром, имеющим достаточно высокую температуру, во-вторых, большими диаметрами РСД по сравнению с РВД.

Если принять запас прочности по поврежденности равным 5, согласно рекомендации РД [4], ресурс ротора будет исчерпан. Но расчетная оценка статической поврежденности роторов паровой турбины К-200-130 показала, что при общем уровне эквивалентных местных напряжений ползучести $(\sigma'_{э})_{\max}$ для стационарного режима 70–150 МПа время до наступления предельного состояния t'_{pj} , определяемое с помощью диаграммы длительной прочности материала [10], может составить 250–350 тыс. часов. При этом необходимо исследовать влияние длительной эксплуатации на свойства стали ротора. Экспериментальные данные работы [11] свидетельствуют, что после 55 тыс. часов эксплуатации металл ротора среднего давления турбины К-200-130 из стали 25Х1М1ФА пластические свойства не изменил, предел усталости остался на исходном уровне. Поэтому необходимо провести экспериментальное исследование длительной прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации с целью уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов.

Испытания на ползучесть и длительную прочность стали 25Х1М1ФА при температуре 500 °С

Для испытаний гладких цилиндрических образцов из роторной стали 25Х1М1ФА были выбраны зоны ротора среднего давления, в которых расчетные условные упругие напряжения достигали максимальных значений. Образцы роторной стали 25Х1М1ФА были вырезаны из РСД паровой турбины К-200-130, наработка которого составила 275031 часов при общем числе пусков 1182.

Проблема оценки и прогнозирования ползучести и высокотемпературной длительной прочности металлов тепловых электростанций, а также остаточной долговечности на сроки до 300 000 часов остается сложной и в достаточной мере нерешенной. С учетом этого, на примере анализа данных о свойствах стали 25Х1М1ФА

(рис. 3) для зоны расположенной в районе обоймы № 1 ближе к поверхности ротора перед диском 13-й ступени приведены экспериментальные и расчетные данные длительной прочности [13, 14]. Эти данные позволили установить следующее значение условного предела длительной прочности стали 25X1M1ФА σ_{10} на базе 10 тыс. часов, равное 195 МПа. Прогноз по МБД-1 на срок службы 100 тыс. часов дал значение 128 МПа.

Испытания выполнялись в соответствии с [6] на установке АИМА-5-2 [2], которая предназначена для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность [12] при постоянной температуре и нагрузке в соответствии с ГОСТ 10145-81, ГОСТ 3248-81.

Испытывались цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и расчетной длиной 100 мм при нагрузках до 2700 кгс и температуре 500 °С. Образец устанавливали в печь, в захваты испытательной машины. Нагрев осуществляли в течение 6 часов, выдержка при заданной температуре составляла 2 часа. После разрушения образца определяли его относительное удлинение δ и относительное сужение ψ . В результате испытаний устанавливали зависимость между напряжением и временем до разрушения при заданной постоянной температуре.

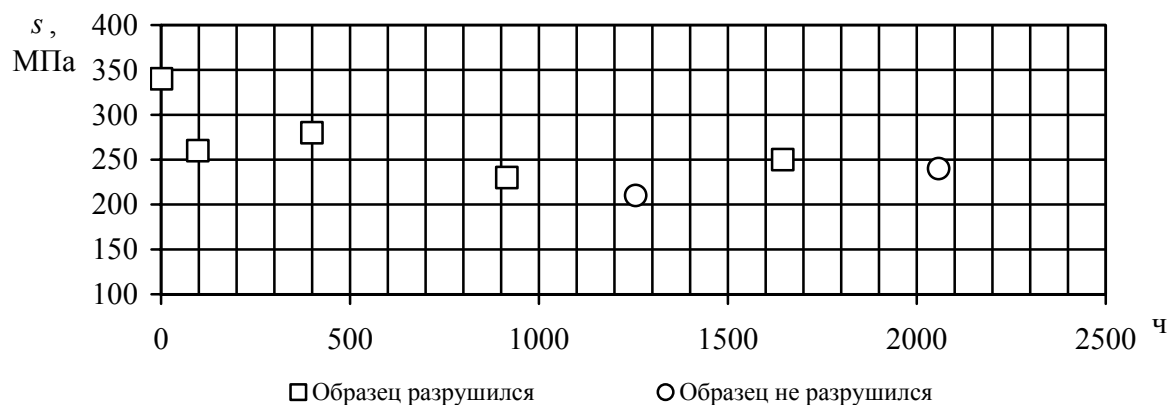


Рис. 3. Длительная прочность стали 25X1M1ФА при температуре 500 °С

Выводы

1. При расчете долговечности деталей энергетического оборудования, работающего в условиях многочисленных переходных режимов, определяющим является выбор коэффициентов запаса прочности и правильное определение исчерпания ресурса в процессе эксплуатации. Оно исключает внезапное хрупкое разрушение вследствие достижения трещиной критического размера или потерю герметичности, а также преждевременный вывод из работы без повреждений [15].

2. Экспериментальные исследования образцов стали ротора среднего давления позволили получить кривые ползучести и длительной прочности стали 25X1M1ФА при температуре 500 °С. Минимальный прогнозируемый условный предел длительной прочности σ_{10} составил 128 МПа.

3. Проведена расчетная оценка длительной прочности и эквивалентного местного напряжения высокотемпературных роторов паровых турбин, основанная на использовании программного комплекса *Solid works* для создания пространственных аналогов элементов турбомашин и программного продукта *COSMOS works* для

определения значений эквивалентного местного напряжения и оценки длительной прочности.

4. По результатам экспериментального (100 тыс. часов при регламентированных ПТЭ стационарных режимах) и расчетного исследования статической поврежденности и остаточного ресурса срок эксплуатации роторов среднего давления паровой турбины К-200-130 можно продлить на 70 тыс. ч.

Список литературы: 1. Контроль металлу 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. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція). 2. Машина для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность АИМА-5-2. – Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1979. – 56 с. 3. Отчет по договору 15/2.098 от 09.10.2007. «Экспериментальная оценка индивидуального остаточного ресурса основных элементов турбины К-200-130 (корпуса ЦВД, ЦСД и ротор СД) ЦИК Кураховская ТЭС». – Киев: НТУУ «КПИ», 2008. 4. 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. 5. СО 153-34.17.440-2003. Инструкция по продлению срока эксплуатации паровых турбин сверх паркового ресурса. – М., 2008. 6. ГОСТ 10145-81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. 7. Черноусенко О.Ю. Обобщение и анализ результатов расчетного исследования индивидуального ресурса корпусов и роторов ЦВД и ЦСД турбины К-200-130 блока 200 МВт // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 6. – С. 107-111. 8. Черноусенко О.Ю. Інформаційна технологія визначення індивідуального ресурсу високотемпературних конструкцій енергомашинобудування / О.Ю. Черноусенко, Е.В. Штефан, А.В. Башта // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – Київ: НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т. 2. – С. 171-176. 9. Черноусенко О.Ю. Концептуальные основы создания автоматизированной системы технической диагностики энергоблоков ЭС // Доклады XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23-26 вересня 2008 р. Доповнення. – Одеса: ОНМА, 2008. – С. 22-23. 10. Ланин А.А. Жаропрочные металлы и сплавы: справочные материалы / А.А. Ланин, В.С. Балина // СПб.: Энерготех, 2006. – Серия «Вопросы энергетики», вып. 8. 11. Гинзбург Э.С. Влияние длительной эксплуатации на сопротивляемость металла ротора паровой турбины многоциклового нагружению / Э.С. Гинзбург, В.Ф. Резинских, А.А. Беляков и др. // Теплоэнергетика. – 1983. – № 12. – С. 37-39. 12. Машина для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность АИМА-5-2. Программа и методика аттестации. 2001. – 10 с. 13. Черноусенко О.Ю. Определение длительной прочности металла роторной стали и оценка продления эксплуатации роторов паровых турбин мощностью 200 МВт сверх паркового ресурса (Часть 1) / О.Ю. Черноусенко, В.В. Кривенюк, Е.В. Штефан // Энергетика и электрификация. – 2010. – № 4. – С. 34-40. 14. Черноусенко О.Ю. Определение длительной прочности металла роторной стали и оценка продления эксплуатации роторов паровых турбин мощностью 200 МВт сверх паркового ресурса (Часть 2) / О.Ю. Черноусенко, В.В. Кривенюк, Е.В. Штефан // Энергетика и электрификация. – 2010. – № 6. – С. 41-47. 15. Трухний А.Д. Расчет деталей паровых турбин на термическую усталость // Теплоэнергетика. – 1984. – № 2. – С. 74-76.

© Черноусенко О.Ю., Никуленкова Т.В., 2011
Поступила в редколлегию 09.02.11