

10. Avramov K. V. Nonlinear dynamics of one disk asymmetrical rotor supported by two journal bearings / K. V. Avramov, A. Borisuk // Nonlinear Dynamics. – 2011. – Vol. 67, №2. – P. 1201–1219.
11. Борисюк А. В. К расчету нелинейных сил, действующих на цапфы роторов на подшипниках скольжения / А. В. Борисюк, К. В. Аврамов // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 48–53.
12. Аврамов К. В. Нелинейная динамика упругих систем. т. 1. Модели, методы, явления / К. В. Аврамов, Ю. В. Михлин. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. – 704 с.

Поступила в редакцию
23.11.12

УДК 621.165.65-192

О. Ю. Черноусенко, д-р техн. наук

НТУУ «Киевский политехнический институт»
(г. Киев, e-mail: cher_olya@2c.kiev.ua)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РОТОРОВ ТУРБИНЫ К-200-130

Проведено экспериментальное и расчетное исследование длительной прочности металла роторной стали 25Х1М1ФА паровых турбин энергоблоков мощностью 200 МВт, отработавших в реальных условиях более 220 тыс. ч. Это исследование основано на учете поврежденности по данным неразрушающего контроля энергетического оборудования и экспериментальным исследованиям длительной прочности реального ротора среднего давления, отработавшего 275031 часов при общем числе пусков 1182. Проведена оценка остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровых турбин мощностью 200 МВт.

Проведено експериментальне та розрахункове дослідження довготривалої міцності металу роторної сталі 25Х1М1ФА парових турбін енергоблоків потужністю 200 МВт, що відпрацювали за реальних умов понад 220 тис. г. Це дослідження базується на врахуванні пошкоджуваності за даними неруйнівного контролю енергетичного обладнання і експериментальних досліджень довготривалої міцності реального ротора середнього тиску, що відпрацював 275031 годин при загальній кількості пусків 1182. Проведено оцінку залишкового ресурсу високотемпературних елементів парових турбін потужністю 200 МВт.

Введение

Для продления эксплуатации энергоблоков 200 МВт определяют остаточный ресурс роторов паровых турбин на основе отраслевого стандарта [1,2]. Продление ресурса в Украине базируется на определении коэффициента запаса длительной прочности по значениям эквивалентного напряжения ползучести, предела длительной прочности при заданной температуре и сроке службы. Основная сложность продления эксплуатации роторов заключается в отсутствии экспериментальных данных о длительной прочности для роторной стали 25Х1М1ФА, отработавшей в реальных условиях более 220 тыс. ч.

Целью работы является экспериментальное и расчетное исследование длительной прочности металла роторной стали после эксплуатации для уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов цилиндров среднего давления (РСД) паровой турбины К-210-130.

Выводы по состоянию роторов паровой турбины К-200-130 и экспериментальное исследование на ползучесть и длительную прочность стали 25Х1М1ФА при температуре 500 °С

Роторы высокого давления (РВД) и РСД давления паровых турбин работают в условиях высокотемпературного нагружения, имеющего смешанный характер. Наряду со стационарными инерционными нагрузками периодически возникают нестационарные напряжения при пусковых и переменных режимах; возможны также динамические воздействия вследствие вибрации. 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.

Расчетная оценка статической поврежденности роторов паровой турбины К-200-130 показала, что отдельные элементы могут приближаться к исчерпанию своего ресурса. 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 [3], может составить 250 тыс. ч. Если принять запас прочности по поврежденности равным 5, ресурс ротора будет исчерпан.

С другой стороны, как указывалось выше, одним из самых ответственных этапов при расчете долговечности деталей проектируемого энергетического оборудования, работающего в условиях многочисленных переходных режимов, является выбор коэффициентов запаса прочности. Также необходимо исследовать влияние длительной эксплуатации на свойства стали ротора. Экспериментальные данные работы [4], например, свидетельствуют, что после 55 тыс. ч эксплуатации металл ротора среднего давления турбины К-200-130 из стали 25Х1М1ФА пластических свойств не изменил, предел усталости остался на исходном уровне. Длительная эксплуатация смещает кривую усталости в сторону меньших долговечностей ($(\sigma'_{-1})_{\text{исх}} = 330$ МПа, $(\sigma'_{-1})_{55000} = 320$ МПа), т. е. происходит уменьшение на 3%. Поэтому необходимо провести экспериментальное исследование длительной прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации с целью уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов.

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 были изготовлены из заготовок, вырезанных из двух зон ротора. Зона 2 была расположена в районе обоймы № 1 ближе к поверхности ротора перед диском 13-й ступени. Зона 3 располагалась в районе придисковой галтели РСД за диском 13-й ступени. Образцы роторной стали 25Х1М1ФА были вырезаны из ротора СД паровой турбины К-210-130, наработка для которого составила 275031 часов при общем числе пусков 1182. Порядок проведения испытаний, описание экспериментальной установки, обработка результатов приведены в работе [5]. Получены данные о длительной прочности стали 25Х1М1ФА. В результате испытаний на ползучесть и длительную прочность стали 25Х1М1ФА при температуре 500 °С прогнозируются следующие условные пределы длительной прочности: $\sigma_{10^5} = 128$ МПа – для зоны 2; $\sigma_{10^5} = 144$ МПа – для зоны 3 (см. данные работы [5]). Кроме того, получены кривые ползучести и длительной прочности стали 25Х1М1ФА при температуре 500 °С для различных зон ротора среднего давления (зона 2 и 3) до 375 тыс. ч эксплуатации.

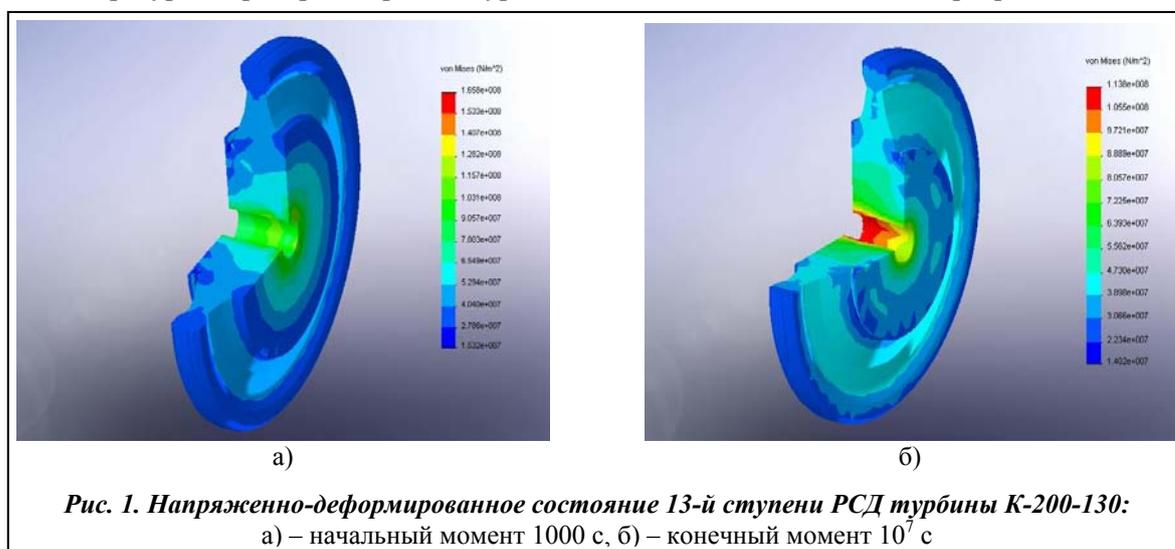
Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния, поврежденности и остаточного ресурса ротора паровой турбины К-200-130 с учетом ползучести и длительной прочности

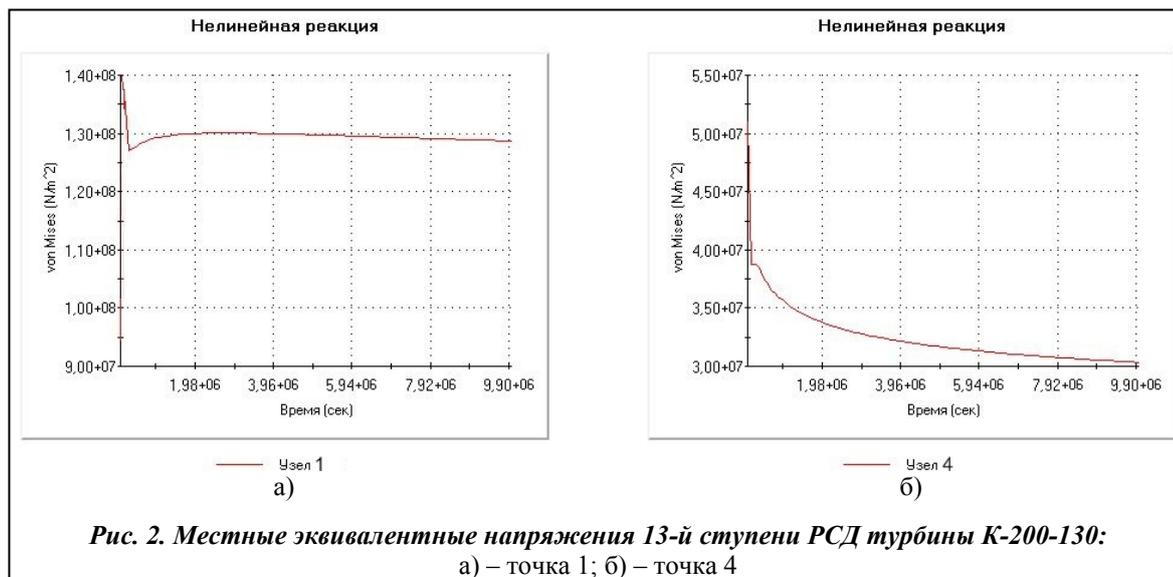
При оценке эквивалентных местных напряжений ползучести для определения статической поврежденности высокотемпературных роторов паровых турбин, накопленной в проверяемой зоне ротора на момент оценки продления срока эксплуатации, используют мо-

дели ползучести, изложенные в работах [6–10]. В высокотемпературных роторах паровых турбин одним из наиболее вероятных мест истощения ресурса является поверхность осевого канала в районе первых ступеней, где температура превышает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Здесь, в условиях максимальных напряжений и температур, наиболее интенсивно протекают процессы ползучести и микроразрушения металла.

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. В руководящем документе РД [2] требования к коэффициенту запаса по длительной прочности и деформациям ползучести занижены по сравнению с [11]. Так, для роторной стали 25X1M1ФА (P2MA) коэффициент запаса по длительной прочности составляет 1,5, а деформация ползучести не должна превышать 0,9% при ресурсе 200 тыс. ч. Для роторов из стали 25X1M1ФА допускается снижение коэффициента запаса по длительной прочности до 1,3, если расчет на ползучесть выполнен по теории старения с использованием изохронных кривых. Возможно снижение этих показателей по результатам экспериментальных исследований металла. Опыт длительной эксплуатации роторов показывает, что предлагаемые в [11] нормы коэффициента запаса по длительной прочности являются завышенными.

В качестве начальных условий при решении задач теплопроводности для РСД паровой турбины К-200-130 в стационарном режиме были приняты распределения температур в момент времени $\tau = 22200\text{ с}$ (выход на номинальную мощность 200 МВт) при пуске из холодного состояния ХС [12]. Термоупругие расчеты напряженно-деформированного состояния РСД паровой турбины К-200-130 показали, что определяющим остаточный ресурс элементом является 13-я ступень РСД в зоне осевого канала и придисковых галтелей. Поэтому в качестве расчетной модели при оценке длительной прочности была выбрана в трехмерной постановке 13-я (первая ступень) РСД паровой турбины К-200-130 [13]. Такое упрощение конструкции объясняется тем, что это наиболее нагруженная часть РСД, а также возможностями вычислительной техники. Расчетная модель РСД для 2D модели содержит 9200 конечных элементов и 9927 узловых точек. Степень сгущения точек увеличивалась в отдельных местах роторов, например в зонах тепловых канавок. Для расчетов использовались РС Pentium R 4 CPU 3,00 GHz, 2,99 ГГц и 512 МБ ОЗУ, расчеты длились до 1–3 часов. Для трехмерных аналогов количество точек увеличивалось до 300-400 тысяч. Для расчетов использовались персональные компьютеры типа Atlon 2x 3,8 GHz, 2 ГБ и 667 МБ ОЗУ и Intel Cor 2DUA 2 ГБ и 800 МБ ОЗУ. Расчеты длились до 8–10 часов на каждом шаге. Методика определения длительной прочности и значений эквивалентного местного напряжения высокотемпературных роторов паровых турбин основана на использовании программного ком-

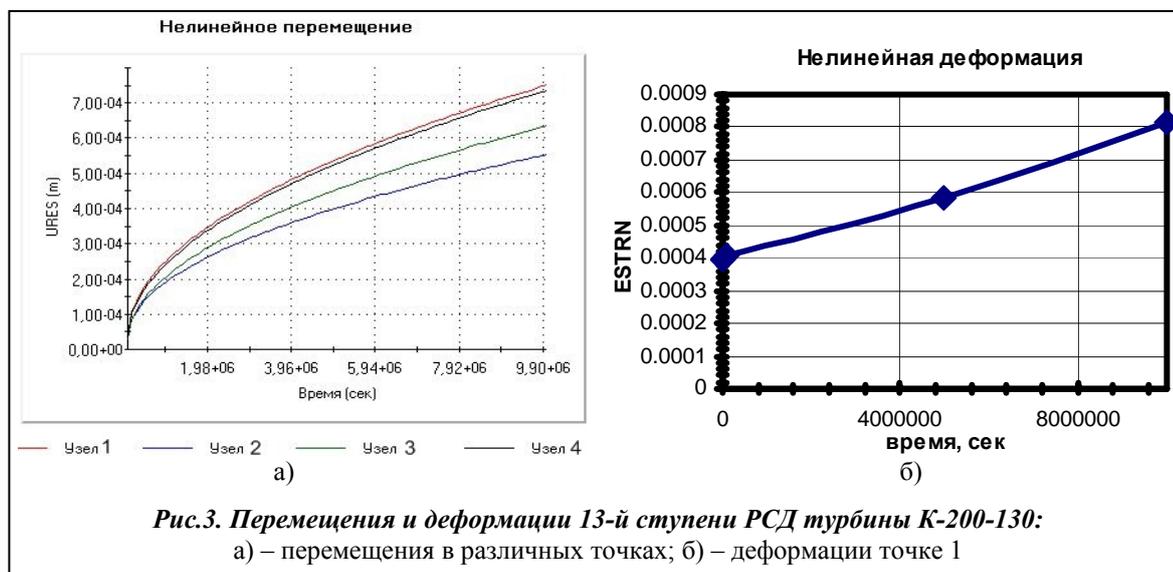




плекса Solid works для создания пространственных аналогов элементов турбомашин и программного продукта COSMOS works для определения значений эквивалентного местного напряжения и оценки длительной прочности.

На рис. 1 приведено напряженно-деформированное состояние 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 в начальный момент времени (1000 с) и в конце расчетного периода (10^7 с). Из расчетов следует, что местные эквивалентные напряжения в начальный период времени максимальны в зоне осевой расточки ротора в области 13-й ступени и составляют 165,8 МПа (рис. 1, а). Через 100 тыс. ч с начала эксплуатации в результате ползучести местные эквивалентные напряжения уменьшаются и составляют 113,8 МПа в зоне осевого канала (рис. 1, б). Местные эквивалентные напряжения 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 в точках 1–4 уменьшаются до 128 МПа – 32 МПа соответственно (рис. 2).

Изменение напряжений в роторе обусловлено релаксационным механизмом в материале, который приводит к увеличению перемещений и деформации (рис. 3). В начальный момент времени перемещения находятся на уровне 0,05 мм, а с течением времени (момент времени $9,9 \cdot 10^6$ с) увеличиваются до 0,55–0,75 мм. Перемещения максимальны в зоне осевого канала 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130, что коррелируется с данными экспериментальных исследований. Деформаций ползучести в зоне осевого канала 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 растут от 0,0394 в начальный момент времени до 0,813% в



момент времени 10^7 с (рис. 3, б). Расчетная деформация ползучести в зоне осевого канала 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 в момент времени 500 тыс. ч составляет 0,5859%. За первые 20 тыс. ч напряжения быстро релаксируют. Местные эквивалентные напряжения 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 уменьшаются от 140 до 127 МПа. Начиная с 50 тыс. ч местные эквивалентные напряжения остаются почти постоянными, равными 127 МПа. Интенсивность напряжений в течение всего времени плавно снижается от 130 МПа до 127 МПа. Главное напряжение σ_1 13-й ступени РСД паровой турбины К-200-130 медленно возрастает до 162 МПа к моменту разрушения. Напряжения у поверхности и время до разрушения конструкции практически не изменяются. Это напряженное состояние и определяет хрупкий характер разрушения, которое происходит при небольших деформациях ползучести (0,9%).

Надо отметить, что в зоне осевого канала запас длительной прочности вполне достаточен. Здесь нормируемая документом величина деформации ползучести в окружном направлении не больше 0,4069%. Согласно [2], для ресурса 100 тыс. ч максимальная окружная деформация ползучести на расточке ротора не должна превышать 0,6%.

Полученная расчетная оценка статической поврежденности роторов среднего давления для этих энергоблоков находится в диапазоне 0,8208–0,6200 (первая цифра графы 4 в таблице) для наиболее консервативного случая, когда время до наступления предельного состояния под действием эквивалентных напряжений определяется с помощью диаграммы длительной прочности материала [3]. Расчетная оценка статической поврежденности РСД энергоблоков с использованием экспериментальных данных лежит в диапазоне 0,7723–0,5833 (вторая цифра графы 4 в таблице). Остаточная наработка в годах и остаточный ресурс РСД энергоблоков посчитаны с учетом данных эксперимента по оценке длительной прочности, деградации статической и циклической прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации.

При консервативном подходе к оценке поврежденности (таблица) расчетный остаточный ресурс РСД паровой турбины К-200-130 энергоблоков ТЭС составляет 84495–175659 ч, что позволяет по результатам экспериментального и расчетного исследования установить срок эксплуатации на уровне до 370 тыс. ч.

*Расчетная оценка повреждаемости, остаточной наработки
в годах и остаточного ресурса роторов РСД энергоблоков ТЭС*

Но- мер блока	Нара- ботка, час	Годовая статическая поврежденность	Статическая поврежденность, по данным [3] / по данным эксперимента	Остаточная наработка, годы	Остаточ- ный ресурс, ч
№11	287304	0,01678	0,8208 / 0,7723	13,53	84495
№13	254079	0,016658	0,7259 / 0,6830	19,03	117922
№14	247001	0,014226	0,6200 / 0,5833	29,16	175659
№15	255690	0,017182	0,7305 / 0,6873	18,16	116066

Выводы

1. 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. Показано, что эквивалентные местные напряжения РСД паровой турбины К-200-130 релаксируют и достигают 128–135 МПа.

2. Расчетная оценка поврежденности РСД паровой турбины К-200-130 показала, что статическая поврежденность металла ротора среднего давления в стационарном режиме составляет порядка 58–77%. Расчетный остаточный ресурс для РСД находится на уровне 84495–175659 ч.

3. По результатам экспериментального исследования и расчетного исследования статической поврежденности и остаточного ресурса срок эксплуатации роторов среднего давления паровой турбины К-200-130 можно продлить на 70 тыс. ч. В результате испытаний на ползучесть и длительную прочность стали 25X1M1ФА при температуре 500 °С прогнозируются следующие условные пределы длительной прочности: $\sigma_{105} = 128$ МПа – для зоны 2; $\sigma_{105} = 144$ МПа – для зоны 3. Кроме того, получены кривые ползучести и длительной прочности стали 25X1M1ФА при температуре 500 °С для различных зон РСД (зона 2 и 3).

Литература

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. *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. – 96 с.
3. *Ланин А. А.* Жаропрочные металлы и сплавы: справочные материалы. Сер. Вопросы энергетики / А. А. Ланин, В. С. Балина. – СПб.: Энерготех, 2006. – Вып.8. – 15 с.
4. *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.
5. *Черноусенко О. Ю.* Определение длительной прочности металла роторной стали и оценка продления эксплуатации роторов паровых турбин мощностью 200 МВт сверх паркового ресурса. Ч. 1 / О. Ю. Черноусенко, В. В. Кривенюк, Е. В. Штефан // Энергетика и электрификация. – 2010. – № 4. – С. 34–40.
6. *Мустафин Ч. Г.* Оценка длительной прочности элементов роторов паровых турбин / Ч. Г. Мустафин // Теплоэнергетика. – 1998. – № 3. – С. 56–60.
7. *Мустафин Ч. Г.* О прогнозировании деформаций ползучести в зонах концентрации напряжений роторов паровых турбин / Ч. Г. Мустафин, В. М. Панасюк // Электрические станции. – 1992. – № 4. – С. 24–27.
8. *Шульженко Н. Г.* К расчету роторов паровых турбин по различным теориям ползучести / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин // Пробл. машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 10–14.
9. *Шульженко Н. Г.* О длительной прочности высокотемпературной зоны осевого канала роторов паровых турбин / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин // Пробл. машиностроения. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 9–16.
10. *Шульженко Н. Г.* Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 71–81.
11. *Турбины паровые стационарные. Расчет на статическую прочность дисков и роторов.* ОСТ 108.020.109-82. – НПО ЦКТИ. – 1983. – 21 с.
12. *Черноусенко О. Ю.* Остаточный ресурс высокотемпературных элементов паровой турбины К-200-130 ЛМЗ / О. Ю. Черноусенко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестн. НТУ «ХПИ». – 2009. – №6. – С. 97–101.
13. *Черноусенко О. Ю.* Определение длительной прочности металла роторной стали и оценка продления эксплуатации роторов паровых турбин мощностью 200 МВт сверх паркового ресурса. Ч. 2 / О. Ю. Черноусенко, В. В. Кривенюк, Е. В. Штефан // Энергетика и электрификация. – 2010. – № 6. – С. 41–47.

Поступила в редакцию
01.09.12