УДК 621.165.62-192

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

СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБИНЫ К-200-130

Результаты расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт, проведенные по разработанному комплексному подходу с учетом ремонтно-восстановительных выборок в металле роторов, корпусов, корпусов клапанов ЦВД и ЦСД, были сопоставлены с данными экспериментальных и расчетных исследований других авторов. Расхождение по температуре для роторов не превышает (1–5) %, а по напряжённо-деформированному состоянию не превышает (2–8) %. Для корпусов и корпусов стопорных клапанов ЦВД и ЦСД напряженно-деформированное состояние совпадает с экспериментальными исследованиями других авторов, что подтверждает возможность использования предложенного комплексного подхода.

Ключевые слова: Тепловое состояние, напряжённо-деформированное состояние, остаточный ресурс, высокотемпературные элементы паровой турбины, ротор, корпус, цилиндр высокого давления, цилиндр среднего давления.

Введение. Для паровых турбин ТЭС мощностью 200 МВт в современных условиях энергорынка Украины из-за частого привлечения их к регулированию электрической нагрузки при продлении эксплуатации актуальной становиться не только оценка остаточной наработки, но и определение допускаемого количества пусков и возможности дальнейшей работы в переменном графике.

При продлении срока эксплуатации паровых турбин согласно нормативным документам [1–3] необходимо оценить остаточный ресурс энергетического оборудования сверх паркового. Одним из основных этапов экспертной оценки продления срока эксплуатации является поверочный расчет, включающий геометрическое моделирование высокотемпературных элементов паровой турбины, определение их теплового и напряженно-деформированного состояния с последующим расчетом повреждаемости и остаточного ресурса.

В поверочном расчете рассматриваются пространственные аналоги роторов, корпусов, клапанов цилиндра высокого давления (ЦВД) и цилиндра среднего давления (ЦСД) с учетом изменений геометрии во время проведения ремонтных кампаний. В процессе проведения неразрушающего контроля высокотемпературных элементов паровых турбин были отмечены различные виды поврежденностей – трещины, растрескивания, промывы и другие повреждения в элементах конструкции. По результатам заключений о проведении визуального контроля лабораториями металла ТЭС и другими специализированными организациями локализованы различные виды поврежденностей в геометрической модели элемента в виде выборок металла различной формы. Такой подход позволил приблизить расчетную модель к реальному состоянию паровой турбины после 190–220 тыс. ч эксплуатации. Поверочный расчёт включает определение напряжённо-деформированного состояния корпусов, корпусов клапанов и роторов ЦВД и ЦСД с учетом их пространственной сложной геометрии, повреждений за период эксплуатации, ремонтно-восстановительных изменений проектной геометрии с использованием программных комплексов *ANSYS* и *COSMOSWorks* [4].

© О.Ю. Черноусенко, 2015

Отличительной особенностью расчетной оценки остаточного ресурса является, во-первых, обязательный учет ремонтно-восстановительных мероприятий по результатам неразрушающего контроля в планово-предупредительном ремонте, проведённом при продлении эксплуатации. Во-вторых, обязательный учет изменяющихся в процессе длительной эксплуатации свойств металла паровой турбины К-200-130. Для определения коэффициентов запаса сталей, отработавших более 220 тыс. часов проводится экспериментальное исследование на образцах (порядка 15 шт.), вырезанных из высокотемпературных элементов. По результатам проведенного экспериментального исследования оптимизируют коэффициенты запаса прочности [4].

Сравнение результатов расчетной оценки напряжённо-деформированного состояния элементов турбины мощностью 200 МВт с данными других авторов

Результаты расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт, проведенные по разработанному комплексному подходу с учетом ремонтно-восстановительных выборок в металле роторов, корпусов и корпусов клапанов ЦВД и ЦСД, [4] были сопоставлены с данными экспериментальных и расчетных исследований других авторов.

Для ротора среднего давления сравнение теплового и напряженно-деформированного состояния проводилось с данными работы [5]. В работе приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния РСД турбины К-200-130 ЛМЗ при основных пусковых режимах, выполненные в двумерной постановке. Сравнение проведено для пуска из горячего состояния после 6–10 часов простоя (ГС), неостывшего состояния после 30–40 часов простоя (НС-1) и холодного состояния (ХС) (рис. 1). Распределение температур на наружной поверхности ротора среднего давления через 9 часов после начала пуска из холодного состояния (кривая *2*), полученные при численном исследовании авторами [5], практически полностью совпадают по всей длине ротора с данными расчетного исследования при 3*D* моделировании по разработанной комплексной методике [4]. Расхождение по температуре нигде не превышает (1–5) % (рис. 1*а*). Изменение напряженно-деформированного состояния по всей длине ротора при пуске из холодного состояния (рис. 1*а*), неостывшего состояния через 2 часа 15 мин. после начала пуска (рис. 1*б*) и их горячего состояния через 1 час 45 мин (рис. 1*в*) аналогично данным авторов [5]. Расхождения по напряжениям (2–8) % объясняются применением 3*D* моделирования в данной работе.

Для цилиндра высокого давления турбины К-200-130 сравнение расчетной оценки теплового (ТС) и напряженно-деформированного состояния (НДС), проведенной по разработанному комплексному подходу с учетом ремонтно-восстановительных выборок в металле корпуса ЦВД, было сопоставлено с данными экспериментальных исследований авторов [6]. В этой работе были проведены натурные тензометрические исследования по определению температур и расчет напряжений по измеренным температурным полям на наружных и внутренних поверхностях корпуса ЦВД паровой турбины К-200-130 Бурштынской ТЭС в 1970 году Институтом машиноведения с участием ЛМЗ. Определенные по данным тензометрии величины напряжений являются средними на участках в 15 мм между точками приварки тензодатчиков.

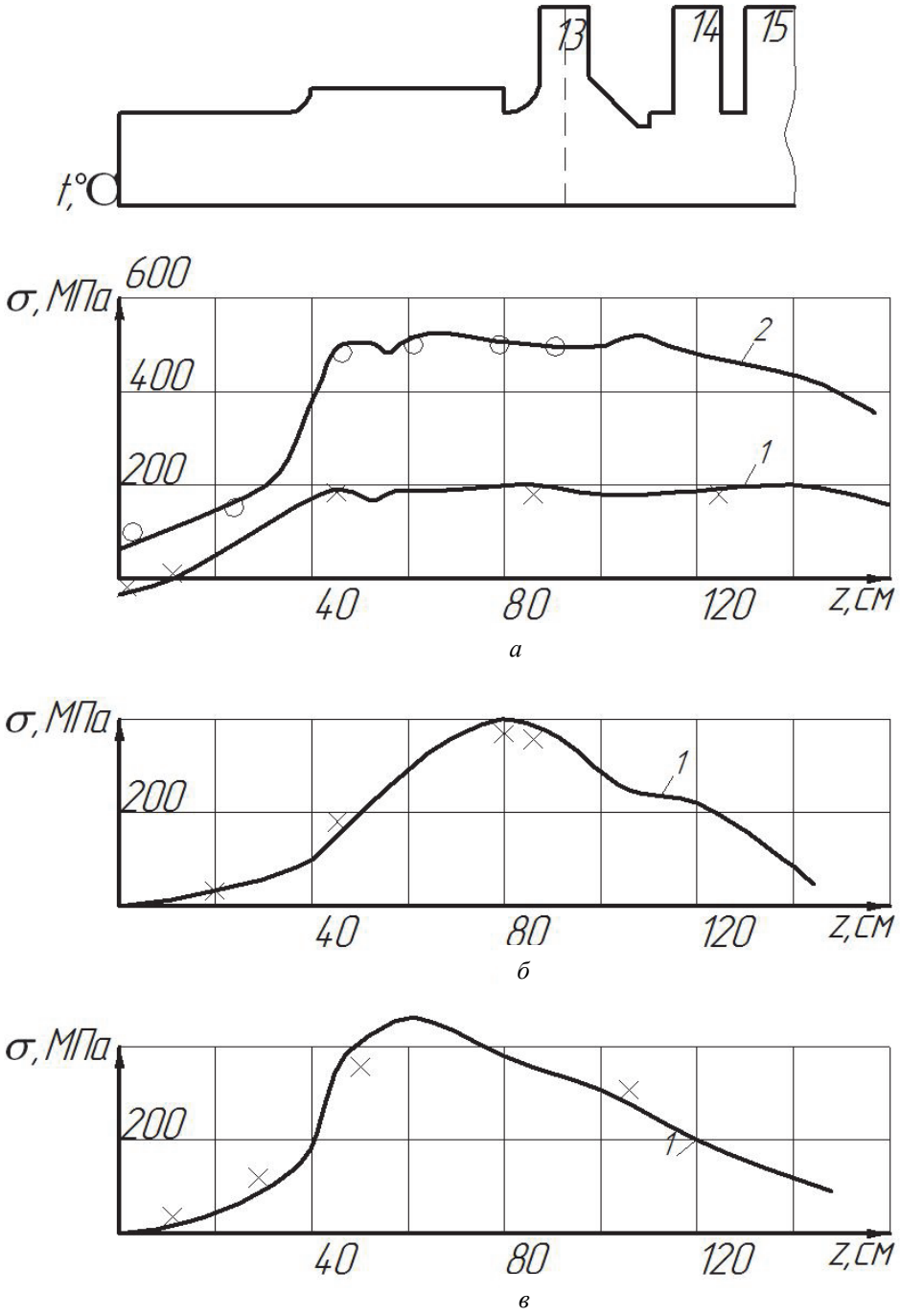


Рис. 1 – Сравнение НДС (кривая *1*) и ТС (кривая *2*) авторов [5] с расчётными данными при 3*D* моделировании: *а* – при пуске из ХС; *б* – НС-1; *в* – ГС; ○ – ТС РСД; × – НДС РСД

Сравнение экспериментальных значений напряжений на наружной ($\sigma_н$) и внутренней ($\sigma_в$) поверхностях корпуса ЦВД (рис. 2) при пуске турбины после 48 часов простоя с данными расчётной оценки теплового и напряжённо-деформированного состояния, проведённой по разработанному комплексному подходу с учётом ремонтно-восстановительных выборок в металле корпуса ЦВД, показали удовлетворительное совпадение для точек внутренней поверхности (точки – ×), так и для точек наружной поверхности (точки – Δ) на рис. 2.

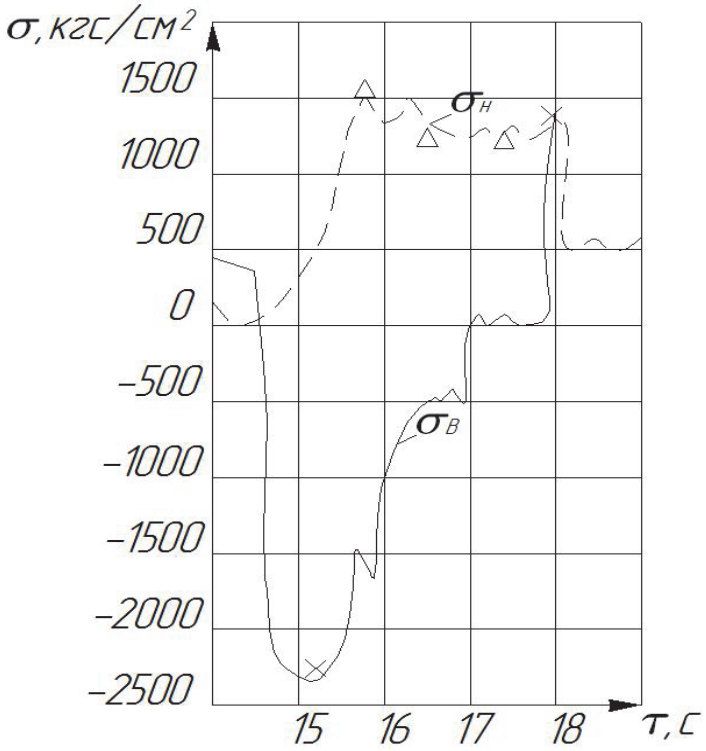


Рис. 2 – Сравнение НДС ($\sigma_н$, $\sigma_в$) авторов [6] при пуске после 48 часов простоя с расчётными данными при 3*D* моделировании:
$\sigma_н$, Δ – НДС наружной поверхности ЦВД; $\sigma_в$, × – НДС внутренней поверхности ЦВД

Для корпуса стопорного клапана цилиндра высокого давления турбины К-200-130 сравнение расчётной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния, проведенной по разработанному комплексному подходу с учетом ремонтно-восстановительных выборок в металле корпуса в ЦВД, было сопоставлено с данными экспериментальных исследований авторов [7]. В этой работе Авруцкий Г.Д., Сенин В.С. и др. использовали метод натурной тензометрии для определения температур на внутренней поверхности стопорного клапана с последующим расчетом напряжений по программе ЦКТИ. Сопоставление значений напряжений на внутренней ($\sigma_{1в}$) поверхности корпуса стопорного клапана АСК ЦВД (рис. 3) с данными расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния, проведенной по разработанному комплексному подходу с учетом ремонтно-восстановительных выборок в металле корпуса стопорного клапана ЦВД, показали удовлетворительное совпадение в зоне внутренней поверхности (точки – × на рис. 3).

Также было проведено сравнение теплового и напряженно-деформированного состояния элементов паровых турбин, полученного авторами [8] с данными расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния, проведенной по разработанному комплексному подходу [9]. Результаты сопоставлений показали, что уровень напряжений для роторов высокого и среднего давления, полученных по данным работы [8], отличается не более чем на (20–25) % при сравнении с расчетными данными при 3*D* моделировании. Это обусловлено учетом разгрузочных отверстий в дисках рабочих лопаток и измененными граничными условиями по боковым поверхностям дисков.

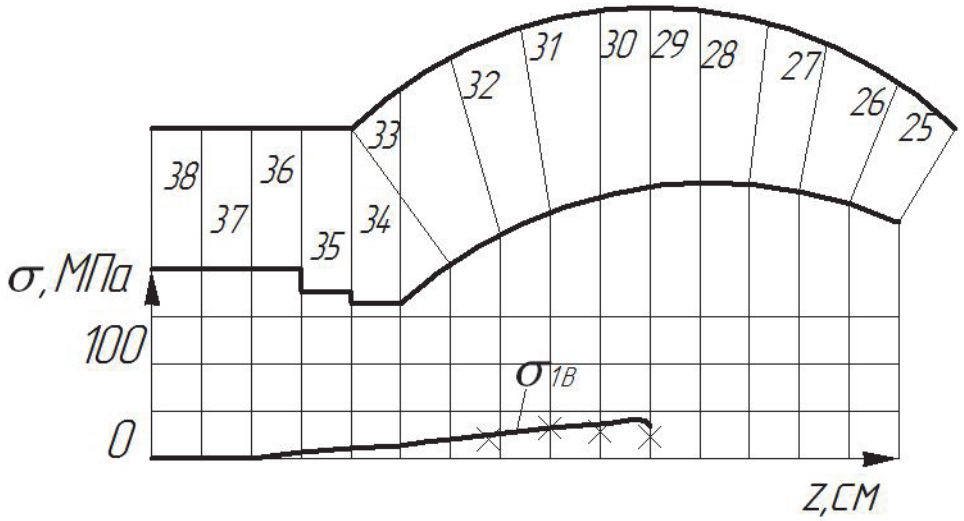


Рис. 3 – Сопоставление НДС ($\sigma_{1в}$) авторов [7] с расчётными данными при 3*D* моделировании АСК ЦВД: $\sigma_{1в}$, × – НДС внутренней поверхности АСК ЦВД

Для корпусов и корпусов стопорных клапанов ЦВД и ЦСД напряженно-деформированное состояние отличается от расчетных исследований других авторов более существенно, иногда на порядок. Это связано со сложностью конструкции этих элементов и невозможностью отразить все ее особенности (фланцы горизонтального разъема, патрубки подвода и отвода пара, дренажные трубки и др.) в оболочечных моделях или двумерных моделях корпусов и корпусов клапанов.

Выводы

1) Сравнение расчётных и экспериментальных данных напряженно-деформированных состояния высокотемпературных элементов турбины К-200-130 показало, что ротора ЦВД и ЦСД могут быть обследованы по ресурсным характеристикам с помощью 2*D* моделей. Расчетное исследование НДС совпадает с экспериментальными данными других авторов. Расхождение по температуре нигде не превышает (1–5) %. Расхождение результатов по напряженно-деформированному состоянию не превышает (2–8) % и объясняются применением 3*D* моделирования в данной работе. Применение 2*D* моделирования для роторов ЦВД и ЦСД позволит сократить затраты на численный эксперимент, что особенно актуально при создании программных комплексов для автоматизированных систем технической диагностики и счетчика ресурса.

2) Корпуса и корпуса клапанов ЦВД, ЦСД требуют использования 3*D* моделей из-за сложности их конструкции, наличия фланцев горизонтального разъема и особенностей течения рабочего тела внутри корпусов этих высокотемпературных элементов турбины К-200-130. Расхождение результатов по напряженно-деформированному состоянию 3*D* моделей на порядок превышает данные по 2*D* моделям. Такое различие приведет к существенному ухудшению ресурсных характеристик и сокращению сроков эксплуатации корпусов ЦВД, ЦСД, корпусов стопорных клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД.

Список литературы: **1.** НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій [Текст]. – 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 [Текст]. – М., 1996. **4.** *Черноусенко, О. Ю.* Оценка малоцикловой усталости паровой турбины К-200-130-3 с применением программного комплекса ANSYS и COSMOS [Текст] / О. Ю. Черноусенко, Е. В. Штефан, Д. В. Рындюк, Д. С. Третяк // Энергетика и электрификация. – 2008. – № 3. – С. 42–48. **5.** Исследование напряжённо-деформированного состояния ротора среднего давления турбины К-200-130 ЛМЗ при различных режимах работы [Текст] / Л. К. Белевцева, В. И. Берлянд, Г. А. Цыплятев и др. // Теплоэнергетика. – 1984. – № 6. – С. 27–30. **6.** Напряжения в цилиндре высокого давления турбины К-200-130 при различных режимах эксплуатации [Текст] / Н. И. Пригоровский, Г. Х. Хуршудов, Ю. К. Михалев и др. // Теплоэнергетика. – 1973. – № 7. – С. 34–38. **7.** Термонапряжённое состояние корпусов регулирующих и стопорных клапанов турбины К-200-130-3 [Текст] / Г. Д. Авруцкий, В. С. Сенин, Е. В. Косякова и др. // Теплоэнергетика. – 1989. – № 12. – С. 53–55. **8.** Котельные и турбинные установки энергетических блоков [Текст]. – Москва : Энергия, 1971. – 268 с. **9.** *Черноусенко, О. Ю.* Комплексная оценка остаточного ресурса паровых турбин на примере К-200-130 [Текст] / О. Ю. Черноусенко // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : сб. научн. трудов. – Харьков : ИПМаш им. Подгорного НАНУ, 2010. – № 4. – С. 128–134.

Bibliography (transliterated): 1. *ND MPE Ukrai'ny. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatacii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostancij. Typova instrukcija. SOU-N MPE 40.17.401:2004.* Print. **2.** *RTM 108.021.103. Detali parovyh stacionarnyh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost'.* No AZ-002/7382. Moscow, 1985. Print. **3.** *RD 34.17.440-96. Metodicheskie ukazanija o porjadke provedenija rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovyh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatacii sverh parkovogo resursa*. Moscow, 1996. Print. **4.** Chernousenko, O. Ju., et al. "Ocenka malociklovoj ustalosti parovoj turbiny K-200-130-3 s primeneniem programmnogo kompleksa ANSYS i COSMOS." *Jenergetika i jelektrifikacija.* No 3. 2008. 42–48. Print. **5.** Belevceva L. K., et al. "Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija rotora srednego davlenija turbiny K-200-130 LMZ pri razlichnyh rezhimah raboty." *Teplojenergetika*. No 6. 1984. 27–30. Print. **6.** Prigorovskij, N. I., et al. "Naprjazhenija v cilindre vysokogo davlenija turbiny K-200-130 pri razlichnyh rezhimah jekspluatacii." *Teplojenergetika*. No 7. 1973. 34–38. Print. **7.** Avruckij, G. D., et al. "Termonaprjazhennoe sostojanie korpusov regulirujushhih i stopornyh klapanov turbiny K-200-130-3." *Teplojenergetika.* No 12. 1989. 53–55. Print. **8.** *Kotel'nye i turbinnye ustanovki jenergeticheskih blokov.* Moscow : Jenergija, 1971. Print. **9.** Chernousenko, O. Ju. "Kompleksnaja ocenka ostatochnogo resursa parovyh turbin na primere K-200-130." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija : sb. nauchn. trudov*. No 4. Kharkov : IPMash NAS of Ukraine, 2010. 128–134. Print.

Поступила (received) 01.02.2015