УДК 621.165.62-192

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

СОПОСТАВЛЕНИЕ 2*D*- И 3*D* РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Проведено сопоставление 2D- и 3D расчетных моделей оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровой турбины большой мощности для продления эксплуатации энергоблоков. Показано, что для расчетной оценки остаточного ресурса роторов ЦВД и ЦСД могут быть использованы 2D модели. Для корпусов ЦВД, ЦСД, а также корпусов клапанов АСК (автоматизированный стопорный клапан) ЦВД и АЗК (автоматизированный защитный клапан) ЦСД надо использовать 3D модели из-за сложности их конструкции, наличия фланцев горизонтального разъема и особенностей течения рабочего тела внутри корпусов.

Ключевые слова: остаточный ресурс, высокотемпературные элементы паровой турбины, ротор, корпус, цилиндр высокого давления, цилиндр среднего давления.

Введение. Высокотемпературные элементы цилиндров высокого (ЦВД) и среднего (ЦСД) давления паровой турбины К-200-130 Ленинградского металлического завода подвергаются воздействию высоких температурных нагрузок на стационарных режимах и значительных температурных скачков на переменных режимах работы. Стоимость этих элементов паротурбинной установки значительна, а надежная работа работоспособность энергоблока. определяет всего В связи с ЭТИМ, высокотемпературные элементы ЦВД и ЦСД в основном обуславливают индивидуальный ресурс энергетического оборудования и требуют комплексного обследования согласно нормативным документам [1-3].

При проведении численного эксперимента по расчетной оценке остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт в качестве расчетных моделей для определения теплового И напряженнодеформированного состояния с использование программного комплекса ANSYS и COSMOSWorks использовались двухмерные (2D) и трехмерные (3D) пространственные аналоги [4-6]. Такой подход обусловлен, с одной стороны, необходимостью наиболее полно отразить в модели все особенности конструкции роторов, корпусов и стопорных клапанов ЦВД и ЦСД паровой турбины мощностью 200 МВт. С другой стороны, минимизировать при возможности затраты операторов ПЭВМ при создании пространственных аналогов, задании массива нестационарных ГУ по всем исследуемым поверхностям, а также затраты машинного времени при проведении комплекса расчетов по всем характерным типам пусков из различных тепловых состояний. Усложнение расчетных моделей литых элементов паровых турбин, таких как корпуса и клапана ЦВД и ЦСД, достигается созданием в редакторах (AVTOCAD, Solid works и др.) трехмерных моделей энергетических объектов с фланцами горизонтального разъема, патрубками отборов, дренажей и т.д.

Постановка задачи, цель исследования

Сопоставление 2*D*- и 3*D* расчетных моделей оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровой турбины большой мощности для продления эксплуатации энергоблоков и обоснованный выбор расчетных моделей.

© О.Ю. Черноусенко, 2014

Расчетное исследование теплового (TC) и напряженно-деформированного состояния по 2D- и 3D расчетным моделям. Сравнение полей температур при 2D и 3D моделировании ротора высокого давления (PBД) паровой турбины K-200-130 в характерный момент времени ($\tau = 2460$ с) для режима пуска по типу HC-2 показывает, что расхождение температурного состояния не превышает 0,01 % (рис. 1–2). При этом, расхождение данных напряженно-деформированного состояния (HДC) для PBД в характерный момент времени составляет 9,5 %. На осевой расточке PBД в зоне регулирующей ступени в момент времени $\tau = 4500$ с при пуске из холодного состояния (XC) сравнение полей температур для 2D и 3D моделей дает расхождение не более 1,74 %.

Различия НДС для РВД в характерный момент времени не превышает 2,5 %, что позволяет допустить использование 2*D* модели для оценки остаточного ресурса РВД.



Рис. 1 – 3*D* модель РВД, пуск из HC-2 (пуск из неостывшего состояния), момент времени прогрева $\tau = 2460$ с: $a - \text{TC}; \delta - \text{H}\text{ДC}$



Рис. 2 – 2D модель РВД HC-2, момент времени прогрева $\tau = 2460$ с: $a - TC; \delta - HДC$

Наличие разгрузочных отверстий в полотне дисков второй, третей и четвертой ступеней вызывает неоднородность ТС и НДС, отмеченную в расчетной модели 3*D*.

Сравнение полей температур для РСД в характерный момент времени при пуске HC-2 (выход на номинальную нагрузку $\tau = 6780$ с) для 2D и 3D модели показало, что расхождение TC не превышает 0,01 % (рис. 3–4). Расхождение напряжений для РСД не превышает 0,5 %. В характерный момент времени для пуска по типу XC (выдержка на 1200 об/мин $\tau = 4500$ с) отличие TC и HДC составляет 2,25 % и 4,0 %,соответственно, что позволяет допустить использование 2D модели для оценки остаточного ресурса РСД.



Рис. 3 – ТС а и НДС б РСД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева т = 6780 с



Рис. 4 – ТС *а* и НДС б РСД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева $\tau = 6780$ с

Характерным моментом времени считается в расчетном исследовании такой, когда возникают в элементах паровой турбины максимальные напряжения и градиент температур в этих точках отмечается также максимальным.

Для корпуса ЦВД при пуске из HC-2 в характерный момент времени (набор нагрузки 5–7 МВт $\tau = 2280$ с) в модели 2D (рис. 5) интенсивности условных упругих напряжений максимальны в зоне паровпуска и составляют 24,5 МПа, а в местах крепления диафрагм меняются в интервале от 42,3–54,3 МПа.



Рис. 5 – ТС а и НДС б ЦВД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева т = 2280 с





Для корпуса ЦВД при пуске из HC-2 в характерный момент времени (набор нагрузки 5–7 MBт τ = 2280с) в модели 3D (рис. 6) приводятся интенсивности условных упругих напряжений в нижней половине корпуса ЦВД. Общий уровень напряжений по сравнению с верхней половиной ЦВД больший на порядок, хотя характер их изменения существенно не отличается.

При сравнении значений интенсивности условных упругих напряжений для 2D моделей и 3D моделей (рис. 5–6) заметно увеличение напряжений на порядок, что можно объяснить наличием фланцев горизонтального разъема, а также наличием большого количества патрубков отбора и другими конструктивными усложнениями трехмерных моделей. Максимальные значения интенсивности условных упругих напряжений возникают в зоне паровпуска (719 МПа) и в области передних концевых уплотнений (539 МПа) во внутренней части верхней половины корпуса, а также в местах крепления обойм диафрагм (450 МПа).

На наружной части верхней половины корпуса ЦВД напряжения также значительны. Значения интенсивности условных упругих напряжений в местах перехода от корпуса к фланцам горизонтального разъема составляют порядка 510 МПа, в местах выхода дренажных трубок отвода паровоздушной смеси из уплотнений порядка 450 МПа, и в зоне подводящих патрубков основного пара равны порядка 420 МПа.

Общий уровень интенсивности условных упругих напряжений в ЦВД при 3D моделировании выше в нижней половине корпуса ЦВД (рис. 6) по сравнению с верхней половиной (рис. 7). Это можно объяснить усложнением геометрической конструкции нижней половины, наличием большого количества отводящих патрубков отборов и различных типов дренажей. Если учесть наличие в них конденсирующейся влаги, то напряженно-деформированное состояние и ресурс этих элементов существенно ухудшится.

Для корпуса ЦВД при пуске из HC-2 в характерный момент времени (начальный этап пуска из неостывшего состояния набор нагрузки 5-7 МВт $\tau = 2280$ с) в модели 3D на рис. 7 показаны интенсивности условных упругих напряжений на верхней половине корпуса ЦВД. Максимальные значения интенсивности условных упругих напряжений возникают в зоне паровпуска в области передних концевых уплотнений и составляют 616 МПа во внутренней части верхней половины корпуса, а также в местах крепления обойм диафрагм порядка 411 МПа. На наружной части верхней половины корпуса ЦВД напряжения также значительны и значения интенсивности условных упругих напряжений в местах перехода от корпуса к фланцам горизонтального разъема составляют порядка 462 МПа.

В корпусе ЦСД при пуске из HC-2 в характерный момент времени (выход на номинальную нагрузку 200 МВт $\tau = 6960$ с) в модели 2D (рис. 8) показаны TC и HДC. Интенсивности условных упругих напряжений максимальны в зоне паровпуска и составляют 135 МПа, а также в местах крепления диафрагм меняются в интервале от 40–70 МПа. Наибольшие напряжение возникают на выступе и в месте крепления диафрагмы передних концевых уплотнений и составляют порядка 200 МПа.

При этом сравнение температурного состояния для 2D моделей и 3D моделей не выявляет отличий, так температура паровпуска ЦСД в 2D модели находится на уровне 539 °C, а в 3D модели составляет 815 °K – 273 °K = 542 °C (рис. 8 и 9). В 3D моделях корпусов ЦВД и ЦСД температура приводится в градусах Кельвина.

Для корпуса ЦСД при пуске из HC-2 в характерный момент времени (выход на номинальную нагрузку 200 MBt $\tau = 6800$ с) в модели 3D (рис. 10) максимальные

значения интенсивности условных упругих напряжений возникают в зоне паровпуска и составляют 813 МПа во внутренней части нижней половины корпуса, а также в местах подхода к корпусу патрубков подвода пара порядка 340 МПа. На наружной части нижней половины корпуса ЦСД напряжения также значительны и значения интенсивности условных упругих напряжений в местах перехода от корпуса к фланцам горизонтального разъема составляют порядка 542 МПа.



Рис. 7 – НДС наружная *a* и внутренняя *б* поверхность верхней части ЦВД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева τ = 2280 с



Рис. 8 – ТС а и НДС б верхняя часть ЦСД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева т = 6960 с

Проведенное сопоставление 2D- и 3D расчетных моделей для оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью

200 МВт показывает, что ротора ЦВД и ЦСД могут быть обследованы по ресурсным характеристикам с помощью 2D моделей. Расхождение результатов по напряженнодеформированному состоянию не превышает (2–5) %. В то же время, корпуса ЦВД, ЦСД, а также корпуса клапанов АСК (автоматизированный стопорный клапан) ЦВД и АЗК (автоматизированный защитный клапан) ЦСД требуют использования 3D моделей из-за сложности их конструкции, наличия фланцев горизонтального разъема и особенностей течения рабочего тела внутри корпусов ЦВД, ЦСД, АСК ЦВД и АЗК ЦСД.



Рис. 9 – ТС наружная *а* и внутренняя *б* части нижней половины ЦСД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева τ = 6800 с



(3D модель) HC-2, момент времени прогрева $\tau = 6800$ с

ISSN 2078-774Х. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 11(1054)

Выводы

1) Сопоставление 2D- и 3D моделей для расчетной оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт показывает, что ротора ЦВД и ЦСД могут быть обследованы по ресурсным характеристикам с помощью 2D моделей. Расхождение результатов по напряженно-деформированному состоянию не превышает (2–5) %. Это позволит сократить затраты на численный эксперимент, что особенно актуально при создании программных комплексов для автоматизированных систем технической диагностики и счетчика ресурса.

2) В то же время, корпусов ЦВД, ЦСД, а также корпусов клапанов АСК ЦВД и АЗК ЦСД требуют использования 3D моделей из-за сложности их конструкции, наличия фланцев горизонтального разъема и особенностей течения рабочего тела внутри корпусов ЦВД, ЦСД, АСК ЦВД и АЗК ЦСД. Расхождение результатов по напряженно-деформированному состоянию 3D моделей на порядок превышает данные по 2D 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: Типова інструкція СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. - На заміну ГКД 34.17.401-95 / Міністерство палива та енергетики України / В. Є. Добровольський (розроб.). - Офіц. вид. - Київ: ОЕП ГРІФРЕ, 2005. - ІХ, 76 с. 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. – М., 1996. 4. Расчет уточнения допустимого периода срока эксплуатации корпусных деталей и роторов К-200-130 ст. № 13: отчет по договору 15/2.07-240408-1Л23/5.42.1 от 24.04.2008 / НТУУ «КПИ», рук. Черноусенко О. Ю. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – 41 с. 5. Розрахункове уточнення подовження терміну експлуатації корпусних деталей турбін (ЦВТ, ЦСТ, корпусів стопорних та регулюючих клапанів) та роторів К-200-130 блоку 200 МВт ст. № 6 СЕ Кураховської ТЕС ТОВ «Востокенерго»: звіт по договору 15/2.077 от 01.12.2005 / НТУУ «КПИ», рук. Черноусенко О. Ю. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 72. с. 6. Розрахункове уточнення подовження терміну експлуатації корпусних деталей турбін (ЦВТ, ЦСТ, корпусів стопорних та регулюючих клапанів) та роторів К-200-130 блоку 200 МВт ст. № 5 СЕ Кураховської ТЕС ТОВ «Востокенерго»: звіт по договору 15/2.084 от 01.06.2006 / НТУУ «КПИ», рук. Черноусенко О. Ю. – К.: НТУУ «КПИ», 2006. – 56 с.

Bibliography (transliterated): 1. *SOU-N MPE* 40.1.17.401:2004. ND MPE Ukrai'ny. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatacii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostancij: Typova instrukcija. Ed. V. Je. Dobrovol's'kyj. Kiev: OEP GRIFRE, 2005. **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. **4.** Chernousenko, O. Ju. "Raschet utochnenija dopustimogo perioda sroka jekspluatacii korpusnyh detalej i rotorov K-200-130 st. № 13." *Otchet po dogovoru* 15/2.07-240408-1123/5.42.1 ot 24.04.2008g. Kiev: NTUU "KPI", 2008. Print. **5.** Chernousenko, O. Ju. "Rozrahunkove utochnennja podovzhennja terminu ekspluatacii' korpusnyh detalej turbin (CVT, CST, korpusiv stopornyh ta reguljujuchyh klapaniv) ta rotoriv K–200-130 bloku 200 MVt st. № 6 SE Kurahovs'koi' TES TOV "Vostokenergo." *Zvit po dogovoru* 15/2.077 ot 01.12.2005g. Kiev: NTUU "KPI", 2006. Print. **6.** Chernousenko, O. Ju. "Rozrahunkove utochnennja podovzhennja terminu ekspluatacii' korpusnyh detalej turbin (CVT, CST, korpusiv stopornyh ta reguljujuchyh klapaniv) ta rotoriv K–200-130 bloku 200 MVt st. № 6 SE Kurahovs'koi' TES TOV "Vostokenergo." *Zvit po dogovoru* 15/2.074 ot 01.06.2006g. Kiev: NTUU "KPI", 2006. Print. **6.** Chernousenko, O. Ju. "Rozrahunkove utochnennja podovzhennja terminu ekspluatacii' korpusnyh detalej turbin (CVT, CST, korpusiv stopornyh ta reguljujuchyh klapaniv) ta rotoriv K–200-130 bloku 200 MVt st. № 5 SE Kurahovs'koi' TES TOV "Vostokenergo." *Zvit po dogovoru* 15/2.084 ot 01.06.2006g. Kiev: NTUU "KPI", 2006. Print.

Поступила (received) 10.02.2014