

УДК 621.165.62-192

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

### **СОПОСТАВЛЕНИЕ 2D- И 3D 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 определяет работоспособность всего энергоблока. 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 напряженно-деформированного состояния с использованием 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 (*AVTOSCAD*, *Solid works* и др.) трехмерных моделей энергетических объектов с фланцами горизонтального разъема, патрубками отборов, дренажей и т.д.

#### **Постановка задачи, цель исследования**

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

Расчетное исследование теплового (ТС) и напряженно-деформированного состояния по 2D- и 3D расчетным моделям. Сравнение полей температур при 2D и 3D моделировании ротора высокого давления (РВД) паровой турбины К-200-130 в характерный момент времени ( $\tau = 2460$  с) для режима пуска по типу НС-2 показывает, что расхождение температурного состояния не превышает 0,01 % (рис. 1–2). При этом, расхождение данных напряженно-деформированного состояния (НДС) для РВД в характерный момент времени составляет 9,5 %. На осевой расточке РВД в зоне регулирующей ступени в момент времени  $\tau = 4500$  с при пуске из холодного состояния (ХС) 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 2D модели для оценки остаточного ресурса РВД.

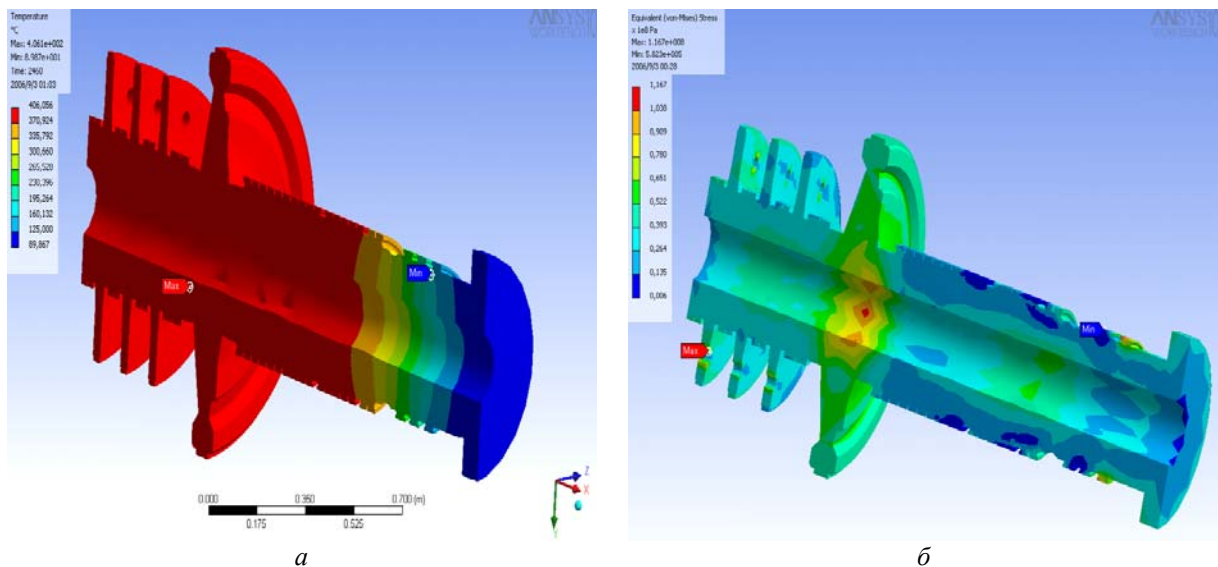


Рис. 1 – 3D модель РВД, пуск из НС-2 (пуск из неостывшего состояния), момент времени прогрева  $\tau = 2460$  с: а – ТС; б – НДС

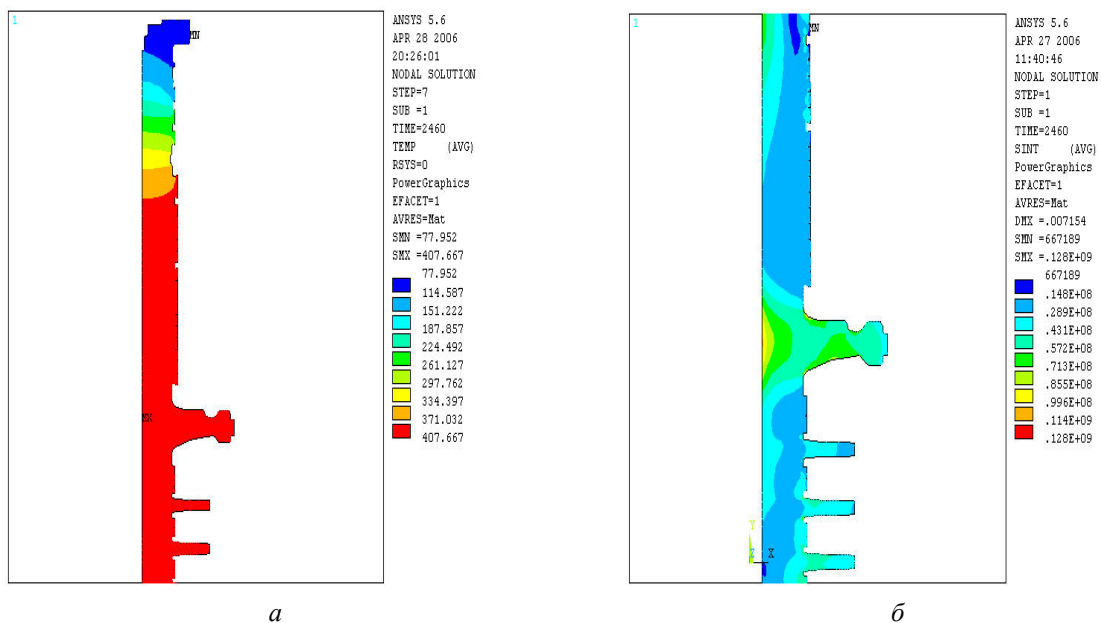


Рис. 2 – 2D модель РВД НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 2460$  с: а – ТС; б – НДС

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

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

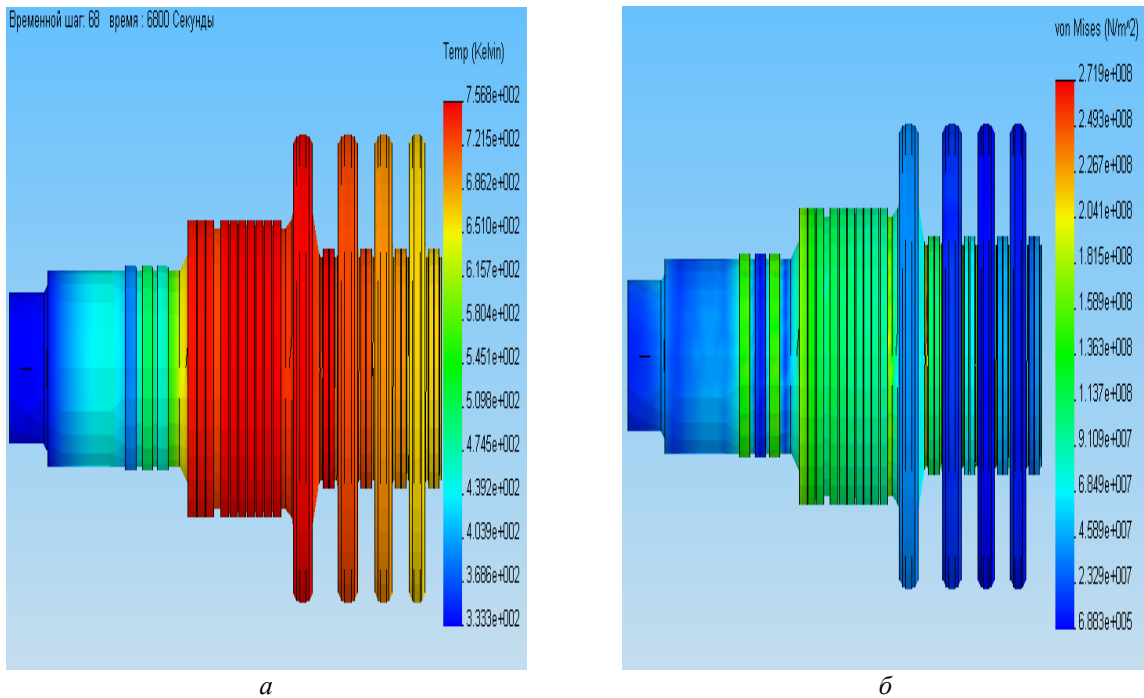


Рис. 3 – ТС *a* и НДС *б* РСД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 6780$  с

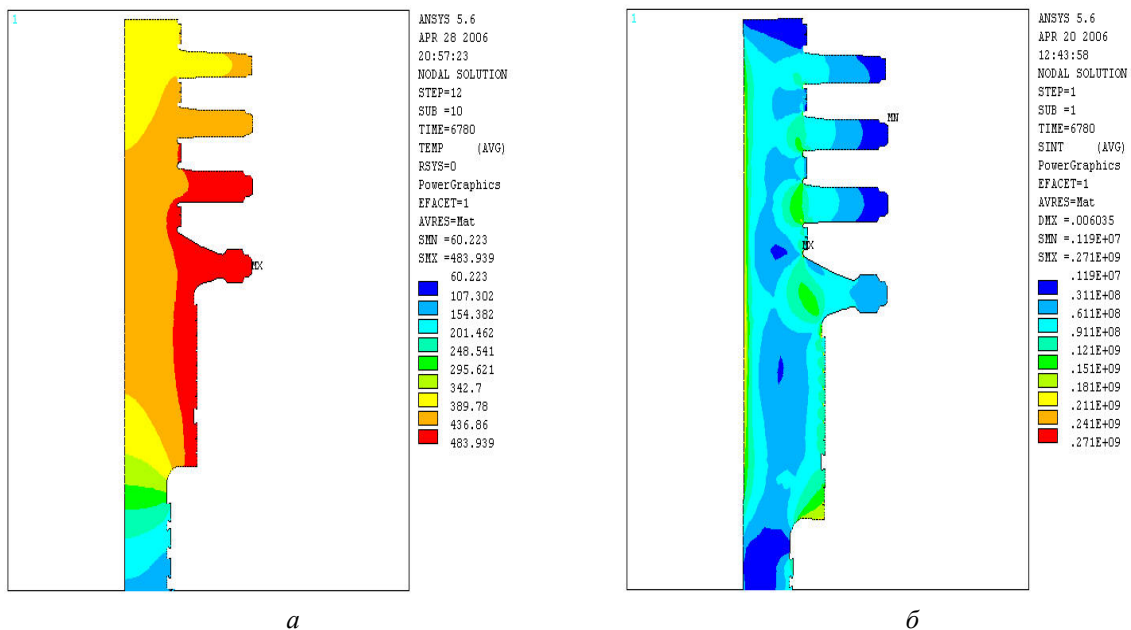


Рис. 4 – ТС *a* и НДС *б* РСД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 6780$  с

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 НС-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.

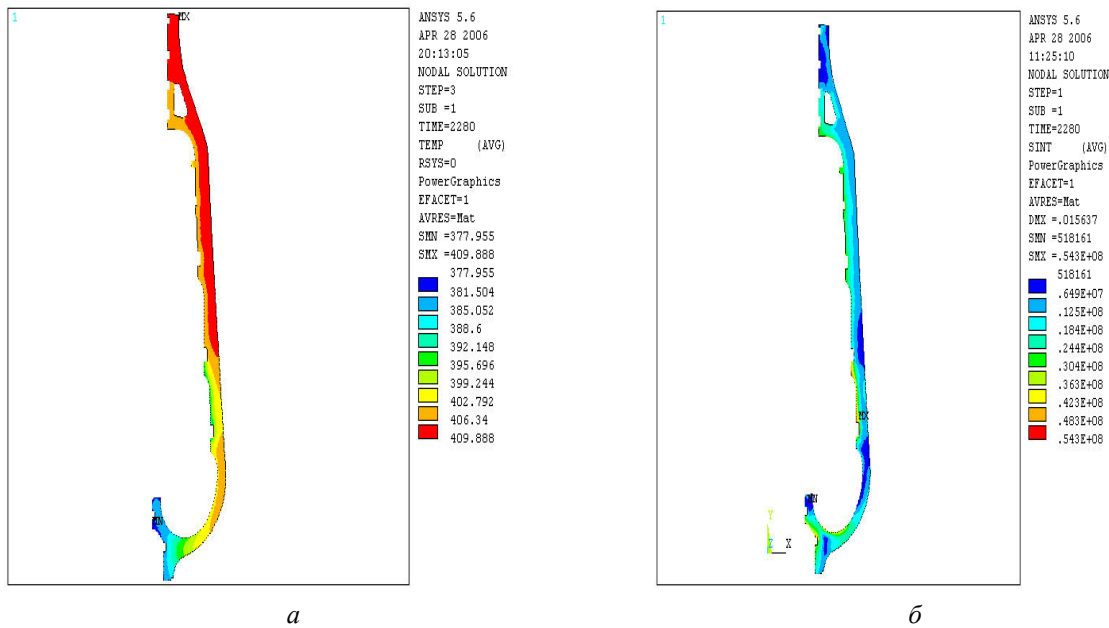


Рис. 5 – ТС *а* и НДС *б* ЦВД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 2280$  с

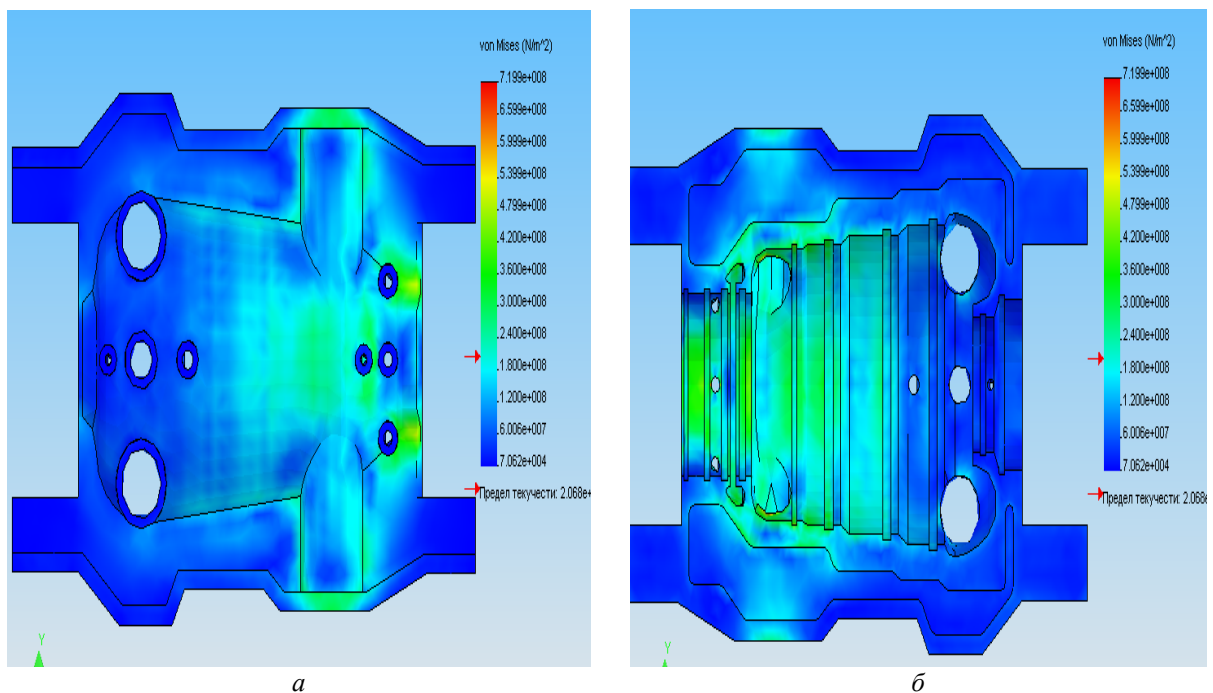


Рис. 6 – НДС наружная *а* и внутренняя *б* поверхность нижней части ЦВД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 2280$  с

Для корпуса ЦВД при пуске из НС-2 в характерный момент времени (набор нагрузки 5–7 МВт  $\tau = 2280$ с) 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 НС-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 НС-2 в характерный момент времени (выход на номинальную нагрузку 200 МВт  $\tau = 6960$  с) в модели 2D (рис. 8) показаны ТС и НДС. 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 напряжения 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 °С, а в 3D модели составляет 815 °К – 273 °К = 542 °С (рис. 8 и 9). В 3D моделях корпусов ЦВД и ЦСД температура приводится в градусах Кельвина.

Для корпуса ЦСД при пуске из НС-2 в характерный момент времени (выход на номинальную нагрузку 200 МВт  $\tau = 6800$  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.

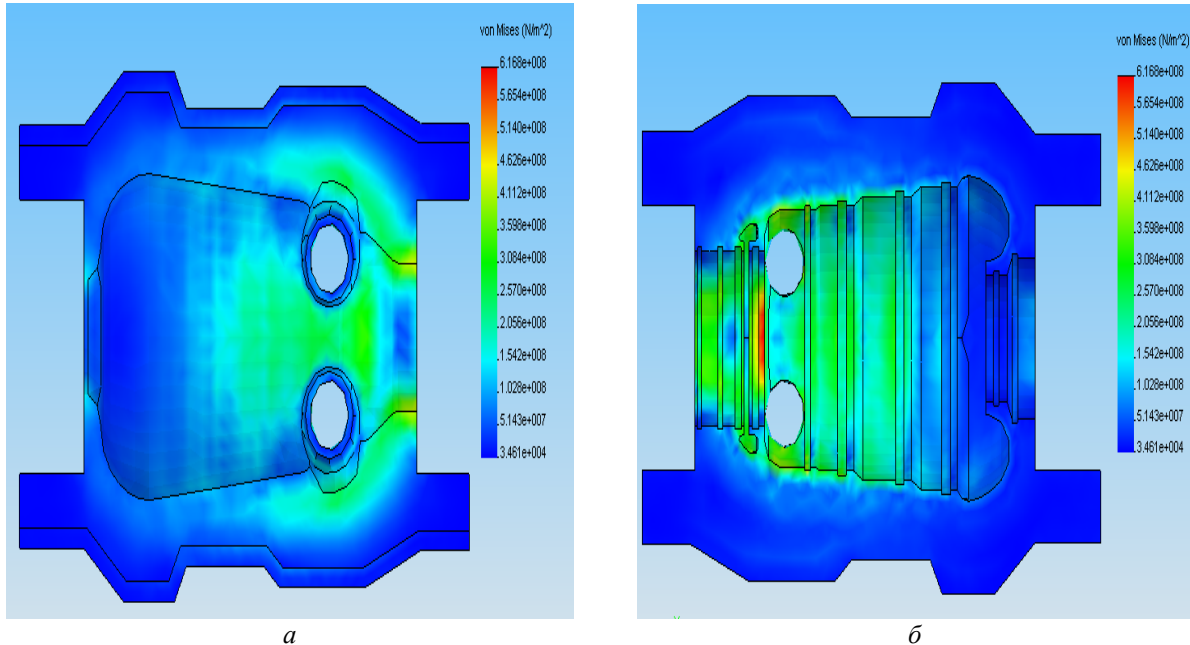


Рис. 7 – НДС наружная *а* и внутренняя *б* поверхность верхней части ЦВД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 2280$  с

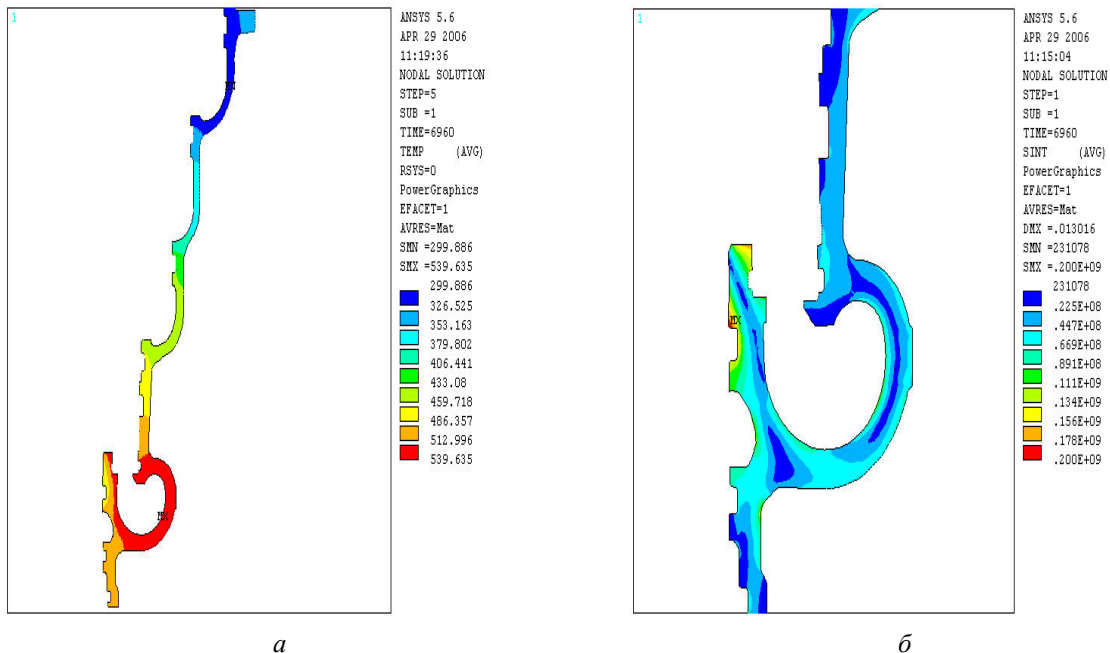


Рис. 8 – ТС *а* и НДС *б* верхняя часть ЦСД (2D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 6960$  с

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



200 МВт показує, що ротора ЦВД і ЦСД можуть бути обстежені по ресурсним характеристикам з допомогою 2D моделей. Расхождение результатов по напряженно-деформированному 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 разреза и особенностей течения рабочего тела внутри корпусов ЦВД, ЦСД, АСК ЦВД и АЗК ЦСД.

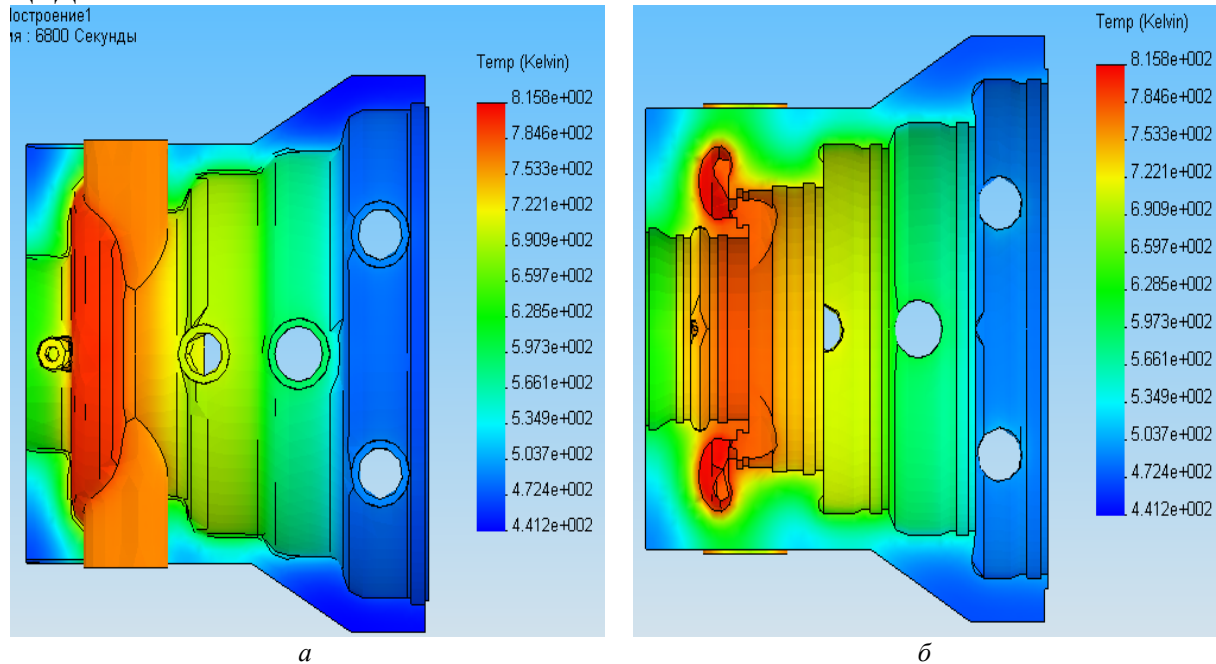


Рис. 9 – ТС наружная *а* и внутренняя *б* части нижней половины ЦСД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 6800$  с

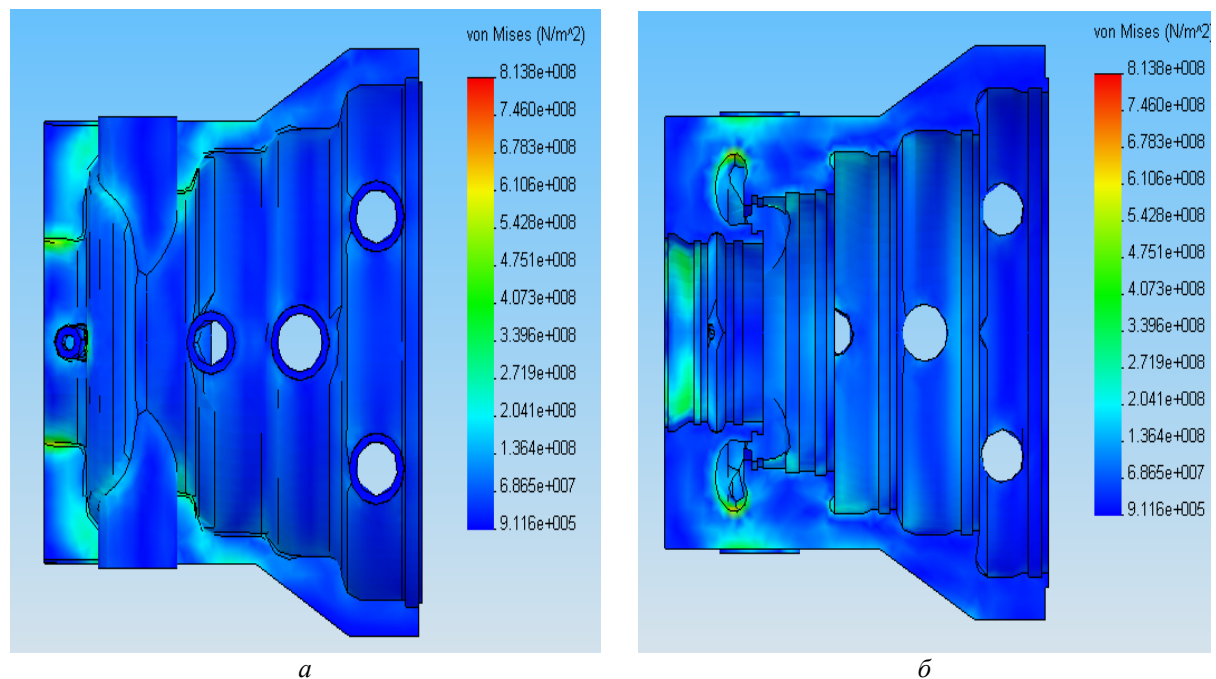


Рис. 10 – НДС наружная *а* и внутренняя *б* части нижней половины ЦСД (3D модель) НС-2, момент времени прогрева  $\tau = 6800$  с

### 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. – IX, 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 Ukrainy. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatacii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh elektrostancij: Typova instrukcija.* Ed. V. Ye. Dobrovols'kyj. Kiev: OEP GRIFRE, 2005. 2. *RTM 108.021.103. Detali parovyh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost'.* No. AZ-002/7382. Moscow, 1985. Print. 3. *RD 34.17.440-96. Metodicheskie ukazaniya o porjadke provedenija rabot pri ocenke individual'nogo resursa parovykh turbin i prodlenii sroka ih jekspluatacii' sverh parkovogo resursa.* Moscow, 1996. 4. Chernousenko, O. Ju. "Raschet utocnennija dopustimogo perioda sroka jekspluatacii' korpusnykh detalej i rotorov K-200-130 st. № 13." *Otchet po dogovoru 15/2.07-240408-1L23/5.42.1 ot 24.04.2008g.* Kiev: NTUU "KPI", 2008. Print. 5. Chernousenko, O. Ju. "Rozrahunkove utocnennja podovzhennja terminu ekspluatacii' korpusnykh detalej turbin (CVT, CST, korpusiv stopornykh ta reguljujuchykh 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 utocnennja podovzhennja terminu ekspluatacii' korpusnykh detalej turbin (CVT, CST, korpusiv stopornykh ta reguljujuchykh 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