

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, В. А. ПЕШКО

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ Т-100/120-130 СТ. № 1 ПАО «ХАРЬКОВСКАЯ ТЭЦ-5»

АННОТАЦИЯ Директива Европейского союза о развитии когенерации до уровня в 10 % от общей выработки электроэнергии определяет развитие централизованного теплоснабжения в крупных городах преимущественным направлением. Для паровых турбин типа Т-100/120-130 разработана математическая модель теплового и напряженно-деформированного состояния. В ходе расчетов, определены максимально нагруженные зоны ротора и значения интенсивностей напряжений в них. Полученные данные позволяют провести оценку малоциклового усталости и остаточного ресурса основного металла турбины на каждом из пусковых режимов эксплуатации.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, ротор ВД, пуск из холодного состояния, из неостывшего состояния, из горячего состояния, тепловое состояние, напряженно-деформированное состояние.

O. CHERNOUSENKO, V. PESHKO

COMPUTATION INVESTIGATION OF THE THERMAL AND STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF THE ROTOR OF HIGH PRESSURE TURBINE T-100/120-130; BLOCK NO 1 OPERATED BY THE PJSC "KHARKIV CHPP-5"

ABSTRACT A Directive of the European Union on the cogeneration development to reach a level of 10 % of the total electric power output defines the development of centralized heat supply to large cities by establishing priorities. A mathematical model of thermal and stress-strain behavior was developed for the steam turbines of a T-100/120-130 type taking into consideration the available damages of designed structures and restoration and repair changes in elements during their operation. The model is based on 3D spatial analogous models used for high pressure rotor. The data of computation investigation include the calculations of thermal and stress-strain behavior of the high pressure rotor of steam turbine T-100/120-130 of 100 MW; block No 1 operated by the PJSC "Kharkiv CHPP-5". The stress-strain behavior was created during the numerical experiment simulating the influence of high temperatures, working medium pressures, centrifugal forces and also a reaction of supports. The analysis of obtained data allowed us to determine maximally loaded rotor zones for each start mode of the operation, in particular the cold start, warm and hot starts. The values of maximum amplitudes of the stress intensities for the most loaded rotor sections were determined that allowed for the evaluation of low cycle fatigue and the residual resource of the main metal of turbine.

Key words: centralized heat supply, high pressure rotor, cold start, warm start, hot start, thermal state, and the stress-strain behavior.

Введение

Надежное обеспечение потребителей тепловой энергией в крупных городах Украины является актуальным, как с точки зрения экологической безопасности, так и с учетом старения оборудования. В настоящее время, ресурс большинства энергоблоков ТЭС Украины мощностью 100–300 МВт, введенных в эксплуатацию в 60–80-е годы двадцатого столетия, достиг 180–320 тыс. ч. Кроме того, основной парк оборудования ТЭС (энергоблоки мощностью от 100 МВт до 300 МВт) морально и физически устарел.

Согласно нормативным документам Министерства энергетики и угольной промышленности Украины парковый ресурс паровых турбин Т-100/120-130 АО «УТЗ» (Уральский турбинный завод) равен 220 тыс. ч. при числе пусков 600 [1]. Ресурс теплофикационных энергоблоков мощностью 100 МВт требует оценки возможности дальнейшей эксплуатации [2–4].

Для продления эксплуатации энергоблоков 100 МВт необходимо провести оценку остаточного ресурса паровой турбины Т-100/120-130 блока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» на основе данных расчетов теплового и напряженно-деформированного состояния с учетом изменения геометрии основных элементов при капитальных ремонтах и экспериментального исследования состояния металла роторов, отработавших более 220000 часов.

Цель работы

Проведение численного эксперимента по оценке теплового и напряженно-деформированного состояния паровой турбины Т-100/120-130 блока № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5», с целью определения интенсивности напряжений в наиболее нагруженных участках ротора высокого давления.

**Расчетное исследование ТС и НДС ротора ВД
паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1
ПАО «Харьковская ТЭЦ-5»**

При проведении поверочного расчета, моделирование теплового (ТС) и напряженно-деформированного состояний (НДС) ротора ЦВД на пусковых режимах работы осуществляли в трехмерной постановке с учетом разгрузочных отверстий в дисках. Расчетное исследование проводилось для наиболее нагруженных участков ротора в соответствующих зонах проточных частей турбоустановки. Граничные условия задавались согласно рекомендациям [5]. Материал роторов – легированная сталь Р2МА (25Х1М1ФА). Теплофизические и физико-механические характеристики стали Р2МА (25Х1М1ФА) в зависимости от температуры задавали в соответствии с [6].

ТС и НДС ротора ЦВД турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» рассчитывалось для трех вариантов пусковых режимов (ГС, НС и ХС) по технологии пуска, которая используется на энергоблоке № 1 Харьковской ТЭЦ-5. Граничные условия для расчетов ТС определялись с использованием реальных и наиболее характерных пусковых графиков, представленных электростанцией.

Исходные данные для расчета ТС ротора ВД скорректированы с учетом графиков пуска и особенностей течения пара в проточной части. Для расчета НДС использованы результаты ТС ротора ВД. Учитывались также механические нагрузки от центробежных сил и давления пара. Для анализа напряженно-деформированного состояния ротора ВД брались характерные сечения и узловые точки, в которых градиенты температур достигали наибольших значений.

При расчетном исследовании теплового состояния ротора ВД решалась задача с учетом радиальной и осевой неравномерности распределения температуры. Перед началом расчетов температурных полей ротора ВД при пусках из различных тепловых состояний решалась задача начального теплового состояния металла, исходя из информации о времени простоя энергоблока и режима остывания.

Краевая задача нестационарной теплопроводности элементов паровых турбин решается с помощью уравнения вида [5]

$$\operatorname{div}[\lambda(T)\operatorname{grad}T] = c(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где λ , c , γ – функции температуры и координат при начальном условии $T_0 = T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$ и граничных условиях I, II, III или IV рода.

На поверхностях ротора ВД задавали нестационарные ГУ I–IV рода с учетом эксплуатационных переменных режимов работы. ГУ I рода, когда известна температура поверхности тела в текущий момент времени. ГУ II рода задавались по тепловому потоку на поверхности тела $q_{\text{ст}} = 0$ для осевого отверстия ротора ВД. ГУ III рода задавались по температурам пара и закономерности теплообмена между средой и поверхностью тела. ГУ IV рода соответствовали идеальному контакту твердых тел, когда оба тела на границе их соприкосновения имеют одинаковые температуры и тепловые потоки, и задавались для контакта валопроводов, дисков и рабочих лопаток.

Напряженно-деформированное состояние ротора ВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковской ТЭЦ-5» рассчитывалось при совместном решении уравнений равновесия, которые в тензорной форме имели вид [7, 8]

$$\{\sigma_{ij}\}_j + \rho X_i = 0; \quad i, j = 1, 2, 3; \quad p_i = f(x, y, z, 0), \quad (2)$$

где σ_{ij} – нормальные и касательные напряжения в элементах турбин; X_i – массовая сила, которая действует в элементах турбин (центробежная сила, сила тяжести и другие); p_i – внешние распределенные нагрузки; ρ – плотность материала элемента.

Также добавлялись уравнения совместности деформаций и закон упругости, в матричной форме имеющий вид

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [a]\{\sigma_{ij}\} + \{\beta \times \Delta T\}, \quad (3)$$

де $\{\varepsilon_{ij}\}$ – вектор деформаций; $[a]$ – матрица упругих коэффициентов; $\{\sigma_{ij}\}$ – вектор напряжений; $\{\beta \times \Delta T\}$ – вектор температурных деформаций; β – коэффициент линейного расширения; ΔT – изменения температуры элементов турбин при эксплуатации.

Тепловое и напряженно-деформированное состояние ротора ВД паровой турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковской ТЭЦ-5» при номинальном режиме работы (мощность 100 МВт) приведено на рис. 1.

При создании пространственного аналога выполнено построение всех поверхностей ротора, включая галтели и радиусные переходы дисков степеней, разгрузочные отверстия, колодцы под заведение рабочих лопаток и геометрия уплотнений. Для сокращения времени проведения численного эксперимента, рассматриваются регулирующая и первые четыре нерегулируемые ступени ЦВД, где температура металла ротора относительно высока, а также имеют место максимальные градиенты температур на пусковых режимах.

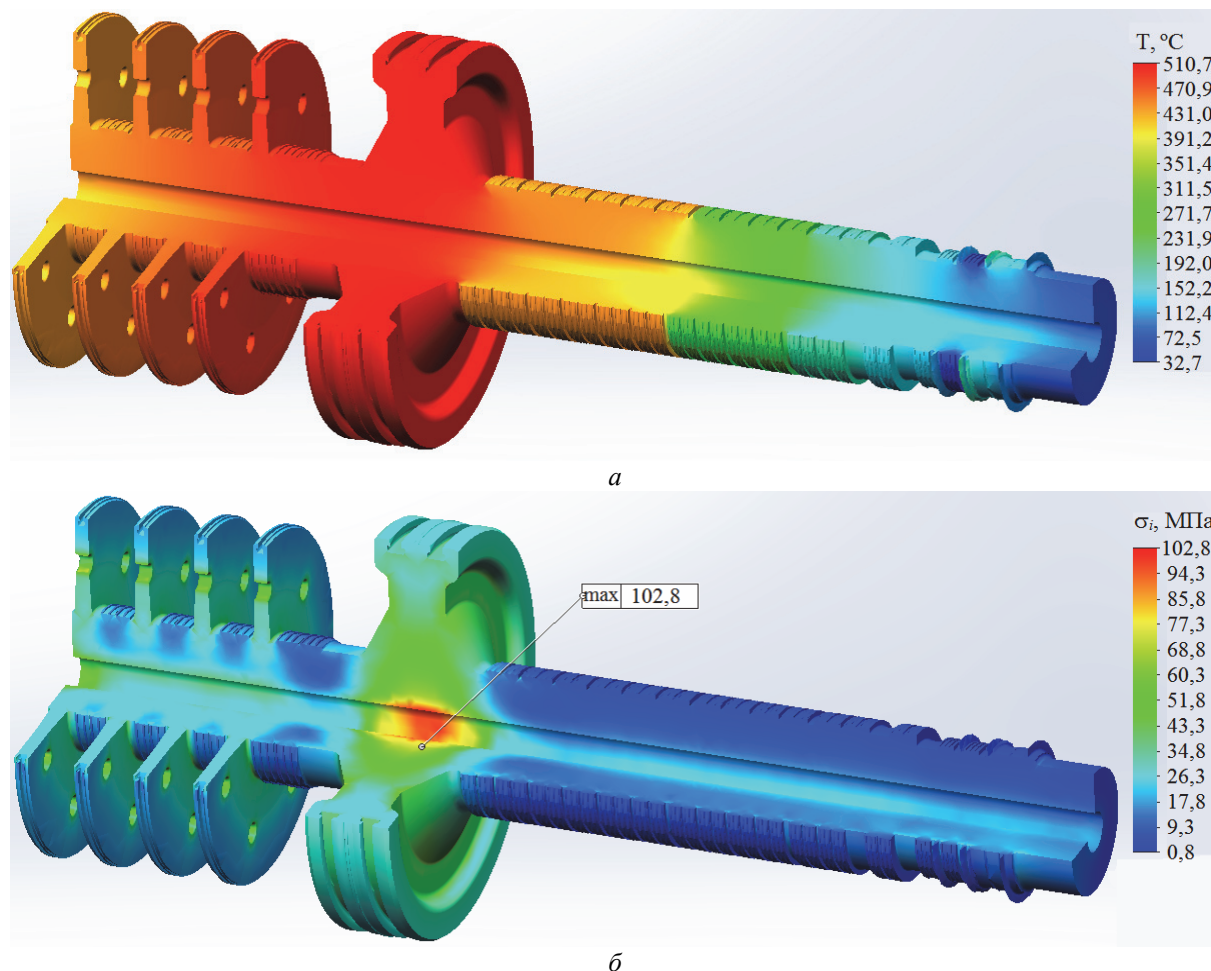


Рис. 1 – Ротор ВД турбины Т-100-120/130 при номинальном режиме работы:
а – тепловое состояние; б – интенсивность напряжений по Мизесу

Характерные сечения, в которых возникают максимальные градиенты температур, для РВД приведены на рис. 2. При пусках из горячего состояния для РВД градиенты температур значительны в момент времени 800 с и 7200 с (рис. 2б), причем максимум градиента температур возникает в зоне передних концевых уплотнений (рис. 3а).

При пусках из неостывшего состояния для РВД градиенты температур значительны в момент времени 800 с, 8400 с, 9300 с (рис. 2в) и также максимум градиента температур располагается в зоне передних концевых уплотнений (рис. 3б). При пусках из холодного состояния максимальный градиент температур возникает в момент времени 16000 с в характерных точках ротора (рис. 2г), нарастает к выходу блока на полную нагрузку в 100 МВт и также максимум градиента температур возникает в зоне передних концевых уплотнений (рис. 3в).

При пусках из горячего состояния для РВД тепловое состояние достигает 485 °С в зоне регулирующей и первых трех нерегулируемых ступеней и 145 °С в зоне третьей обоймы передних концевых уплотнений в момент времени 7200 с

(рис. 4). Максимальные интенсивности напряжений в момент времени 7200 с сосредоточены в области осевой расточки ротора диска первой ступени РВД ($\sigma_i = 158$ МПа), а также в зоне передних концевых уплотнений ($\sigma_i = 210$ МПа). Значения максимальной амплитуды интенсивности напряжений, определяющие ресурс, при пуске из ГС для РВД составляют 87,15 МПа при температуре металла $t_m = 500$ °С и расположены в осевой расточке ротора ВД в зоне регулирующей ступени (точка 1 на рис. 2).

При пусковых режимах турбинного оборудования, соответствующих неостывшему состоянию основного металла в области регулирующей ступени, характерно возникновение зон максимальной интенсивности напряжений как на осевой расточке ротора диска первой ступени РВД ($\sigma_i = 178$ МПа), так и в зоне передних концевых уплотнений ($\sigma_i = 154$ МПа) в момент выхода блока на номинальный режим (18900 с) (рис. 5). Тепловое состояние РВД при пусках по типу НС меняется от 458 °С в зоне регулирующей и первых трех нерегулируемых ступеней до 136 °С в зоне третьей обоймы передних концевых уплотнений.

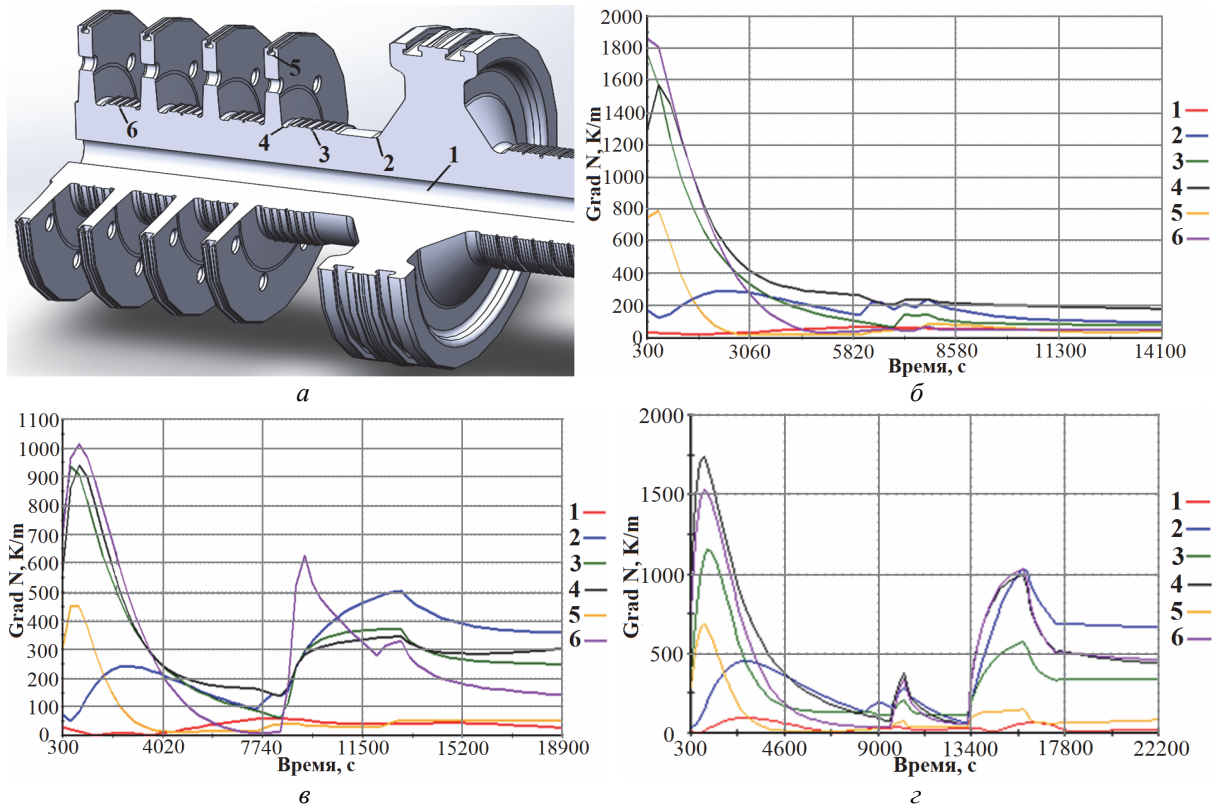


Рис. 2 – Градиенты температур для ротора ВД (область проточной части):
 а – характерные узлы; б – пуск из ГС; в – пуск из НС; г – пуск из ХС

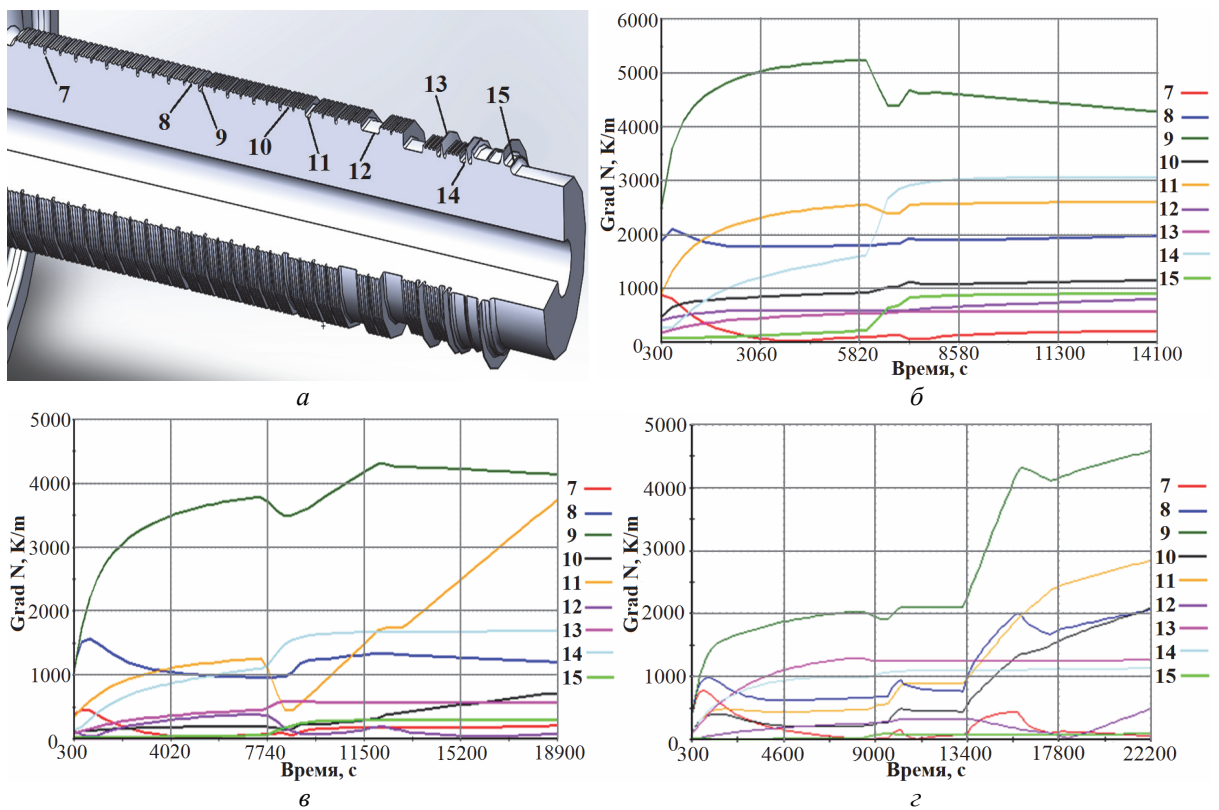


Рис. 3 – Градиенты температур для ротора ВД (область передних концевых уплотнений):
 а – характерные узлы; б – пуск из ГС; в – пуск из НС; г – пуск из ХС

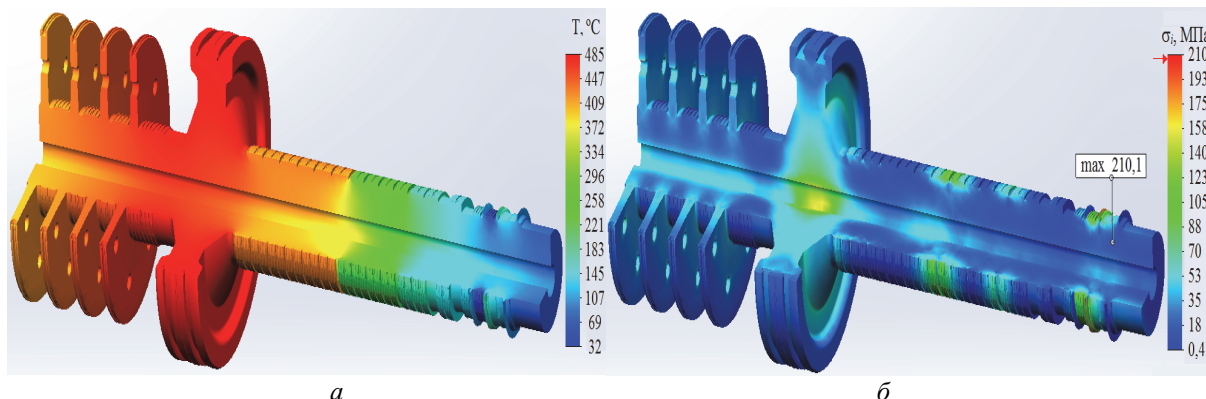


Рис. 4 – РВД при виході турбоагрегата на 3000 об/мин (7200 с) при пуску из ГС: а – ТС; б – НДС

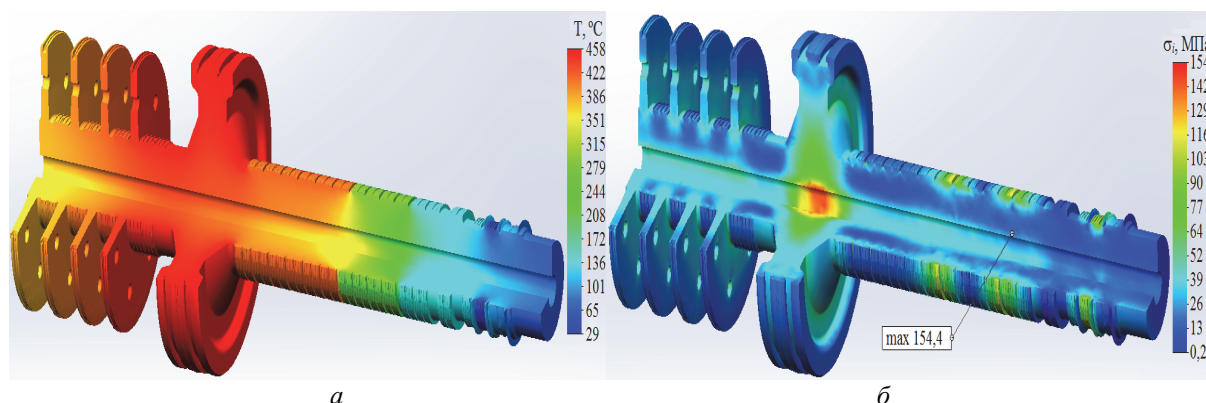


Рис. 5 – РВД при виході на номінальний режим роботи (18900 с) при пуску из НС: а – ТС; б – НДС

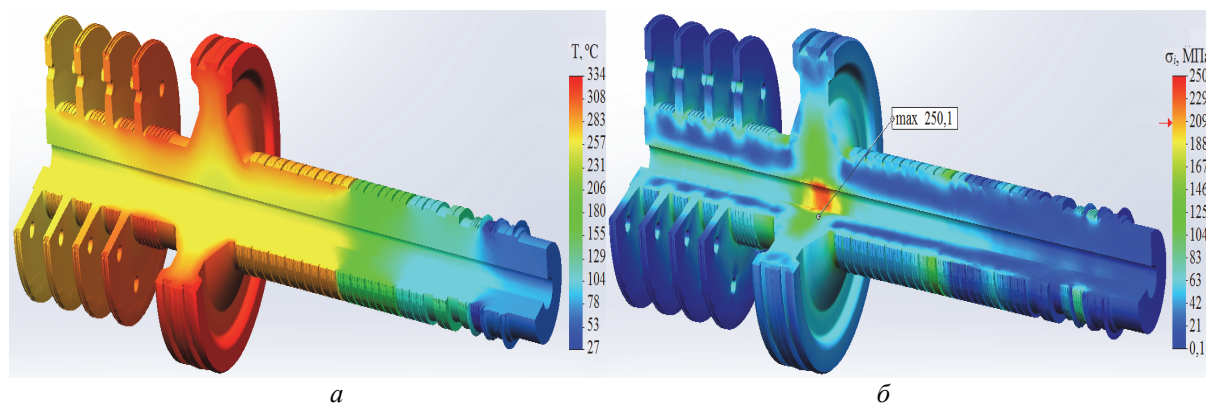


Рис. 6 – РВД в момент времени 16000 с при пуску из ХС: а – ТС; б – НДС

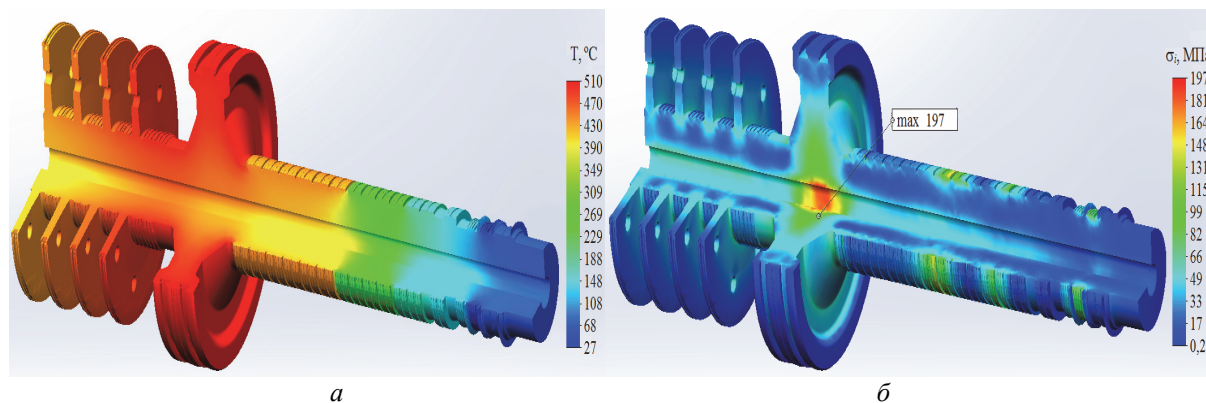


Рис. 7 – РВД при виході на номінальний режим роботи (22200 с) при пуску из ХС: а – ТС; б – НДС

Для РВД при пусках из неостывшего состояния значительный градиент температур возникает в конце режима нагружения (18900 с), а также в моменты времени 9300 с и 12900 с. Большие значения интенсивности напряжений наблюдаются в зоне передних концевых уплотнений ($\sigma_i = 77\text{--}154$ МПа) и в осевом отверстии в зоне первой ступени ($\sigma_i = 133\text{--}178$ МПа) в конце режима нагружения (18900 с). Наибольшие значения интенсивности напряжений наблюдаются в зоне осевого отверстия первой двухвенечной ступени скорости ($\sigma_i = 178$ МПа) в момент выхода на номинальный режим эксплуатации 100 МВт. Значения амплитуды интенсивности напряжений, определяющей ресурс РВД при пуске из НС составляет $\sigma_a = 98,85$ МПа.

При пусках из холодного состояния для РВД наибольшие значения интенсивности напряжений наблюдаются у осевой расточки в зоне первой регулирующей двухвенечной ступени скорости ($\sigma_i = 124\text{--}250$ МПа) и на валу в зоне передних концевых уплотнений ($\sigma_i = 76\text{--}113$ МПа) (рис. 6). Тепловое состояние РВД при пусках по типу ХС меняется от 510°C в зоне регулирующей и первых трех нерегулируемых ступеней до 137°C в зоне третьей обоймы передних концевых уплотнений. Значения максимальных интенсивностей условных упругих напряжений наблюдаются в зоне первой регулирующей двухвенечной ступени скорости ($\sigma_i = 250$ МПа) в момент времени $\tau = 16000$ с и на уровне $\sigma_i = 197$ МПа при выходе на номинальный режим работы 100 МВт в момент времени $\tau = 22200$ с.

Напряжения в тепловых канавках передних концевых уплотнений РВД также значительны и составляют порядка $\sigma_i = 148\text{--}167$ МПа, что показано на фрагменте РВД (рис. 7). Значения амплитуды максимальных интенсивностей напряжений, определяющих ресурс, при пуске из ХС для РВД составляют $\sigma_a = 135$ МПа при температуре металла $t_m = 500^\circ\text{C}$.

Данные теплового и напряженно-деформированного состояния РВД позволяют провести расчеты малоциклового усталости металла ротора ВД.

Выводы

1 Для паровых турбин типа Т-100/120-130 разработана математическая модель теплового, напряженно-деформированного состояния ротора ЦВД, с учетом имеющихся повреждений проектных конструкций и ремонтно-восстановительных изменений элементов, на базе 3D-пространственных аналогов.

2 При пусках из неостывшего состояния для РВД градиенты температур значительны в момент времени 800 с, 8400 с, 9300 с, а максимум градиента температур располагается в зоне передних концевых уплотнений. При пусках из холодного состояния для РВД максимальный градиент темпе-

ратур возникает в момент времени 16000 с и нарастает к выходу блока на полную нагрузку в 100 МВт.

3 Максимальные интенсивности напряжений сосредоточены в области осевой расточки регулирующей ступени РВД, а также в зоне передних концевых уплотнений. Значения размахов максимальной интенсивности напряжений, определяющие ресурс, при пуске из ГС составляют $\sigma_a = 87,15$ МПа при температуре металла $t_m = 500^\circ\text{C}$ и расположены в осевой расточке ротора ВД в зоне регулирующей ступени. Максимальная амплитуда интенсивности напряжений при пуске из неостывшего состояния $\sigma_a = 98,85$ МПа, при пуске из ХС – $\sigma_a = 135$ МПа.

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 40.17.401:2004. – Офіц. вид. – Київ : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
- 2 **Мацевитый, Ю. М.** Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путём модернизации, реконструкции и совершенствования режимов их эксплуатации : моногр. / **Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Шульженко, В. Н. Голощанов** [и др.]. – Киев : Научная мысль, 2008. – 366 с. – ISBN 978-9-660-00850-3.
- 3 Енергетична стратегія України на період до 2030 року // Спец. випуск інформаційно-аналітичного бюлетеня. 23 березня 2006 р. – Київ : Відомості Мінпаливенерго України. – 2006. – 144 с.
- 4 **Базеев, Е. Т.** Энергетика: история, настоящее и будущее. Т. 3. Развитие тепловой и атомной энергетики / **Е. Т. Базеев, Б. Д. Билека, Е. П. Васильев** [и др.]. – Киев, 2008. – 528 с.
- 5 РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчёт температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. – Москва, 1973. – № ВК-002/3209. – 104 с.
- 6 РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчёт на малоцикловую усталость. – Москва, 1985. – № АЗ-002/7382. – 49 с.
- 7 **Биргер, И. А.** Сопrotивление материалов : учеб. пособие / **И. А. Биргер, Р. П. Мавлютов**. – 2-е изд. – Москва : Ленанд, 2015. – 560 с. – ISBN 978-5-9710-1808-7.
- 8 **Костюк, А. Г.** Динамика и прочность турбомашин : учеб. для вузов по спец. «Турбиностроение» / **А. Г. Костюк**. – Москва : Машиностроение, 1982. – 264 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 (2005), *ND MPE Ukrayiny`. Kontrol` metalu i prodovzhennya terminu ekspluataciyi osnovny`x elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovy`x elektrostancij*. – *Ty`pova instrukciya. SOU-N MPE 40.17.401:2004 [RD of MFEU. Metal inspection and extending operating life of main components of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2004]*, GRIFRE, Ministry of fuel and energy of Ukraine, Kiev,

- Ukraine.
- 2 **Matseviy, Yu. M., Shulzhenko, N. G. and Goloschakov, V. N.** (2008), *Povyshenie jenergojektivnosti raboty turboustanovok TJeS i TJeC putem modernizacii, rekonstrukcii i sovershenstvovanie rezhimov ih jekspluatcii [Improving the energy efficiency of work of TPP and CHPP turbines by modernization, reconstruction and improvement of their operation modes]*, Nauk. Dumka, Kiev, ISBN 978-9-660-00850-3, Ukraine.
 - 3 (2006), "Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2030 roku [Energy Strategy of Ukraine until 2030]", *Spets. vypusk informatsiyno-analitychnoho byuletenuya. 23 bereznya 2006 r. [Special Issue of Information-analytical bulletin. March 23, 2006]*, Vidomosti Minpal'yvernerho Ukrayiny, Kiev, Ukraine.
 - 4 **Bazeev, E. T., Bileka, B. D., Vasilev, E. P.** et al (2008), *Energetika: istoriya, nastoyaschee i bu-dushee. T. 3. Razvitie teplovoj i atomnoj energetiki [Power engineering: history, present and future. V. 3. The development of thermal and nuclear power engineering]*, Kiev, Ukraine.
 - 5 (1973), RTM 24.020.16-73. *Turbiny parovye stacionarnye. Raschet temperaturnykh polej rotorov i cilindrov parovykh turbin metodom jelektromodelirovaniya [Stationary steam turbines. The calculation of the temperature fields of the rotors and the cylinders of steam turbines by electrical analogy method]*, Moscow, Russian.
 - 6 (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovykh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost' [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation]*, Moscow, Russian.
 - 7 **Birger, I. A. and Mavlyutov, R. R.** (2015), *Soprotivlenie materialov [Material resistance]*, Lenand, Moscow, ISBN 978 5-9710-1808-7, Russian
 - 8 **Kostyuk, A. G.** (1982), *Dinamika i prochnost turbomashin [Dynamics and strength of turbomachines]*, Mashinostroenie, Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Черноусенко Ольга Юрьевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Теплоэнергетических установок Тепловых и Атомных Электростанций, Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев; тел.: (067) 504–82–92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; cher_olya@2c.kiev.ua; ORCID 0000-0002-1427-8068.

Chernousenko Olga Yuriivna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv, Ukraine.

Пешко Виталий Анатольевич – аспирант кафедры Теплоэнергетических установок Тепловых и Атомных Электростанций, Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт им. Игоря Сикорского»; г. Киев; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID 0000-0003-0610-1403.

Peshko Vitaliy Anatoliyovych – Postgraduate Student at the Department of Cogeneration Installations of Thermal and Nuclear Power Plants, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Kyiv, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Черноусенко, О. Ю. Расчетное исследование теплового и напряженно-деформированного состояния ротора высокого давления турбины Т-100/120-130 ст. № 1 ПАО «Харьковская ТЭЦ-5» / **О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 34–40. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.

Please cite this article as:

Chernousenko, O. and Peshko, V. (2017), "Computation Investigation of the Thermal and Stress-Strain Behavior of the Rotor of High Pressure Turbine T-100/120-130; block No 1 Operated by the PJSC "Kharkiv CHPP-5", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 34–40, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Черноусенко, О. Ю. Розрахункове дослідження теплового і напружено-деформованого стану ротору високого тиску турбіни Т-100/120-130 ст. № 1 ПАТ «Харківська ТЕЦ-5» / **О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 34–40. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.05.

АНОТАЦІЯ Директива Європейського союзу про розвиток когенерації до рівня в 10 % від загального виробітку електроенергії визначає розвиток централізованого теплопостачання у великих містах переважним напрямком. Для парових турбін типу Т-100/120-130 розроблена математична модель теплового і напружено-деформованого стану. В ході розрахунків, визначені максимально навантажені зони ротора і значення інтенсивностей напружень в них. Отримані дані дозволяють провести оцінку малоциклової втомлюваності і залишкового ресурсу основного металу турбіни.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, ротор ВТ, пуск з холодного стану, з неостиглого стану, з гарячого стану, тепловий стан, напружено-деформований стан.

Поступила (received) 29.01.2017