

УДК 621.165:539.4

РАСЧЕТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕРМОПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Н. Г. Шульженко, д-р техн. наук,
shulzh@ipmach.kharkov.ua

П. П. Гонтаровский, канд. техн. наук,
gontarovskijpavel@gmail.com

Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук,
garm.nataly@gmail.com

И. И. Мележик, канд. техн. наук,
melezhyk81@gmail.com

Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков,
Украина

Эффективная и надежная работа энергетических агрегатов тесно связана с обеспечением термостойкости и долговечности их элементов и узлов. Требования современного энергорынка приводят к эксплуатации оборудования на переменных режимах, что вызывает ускоренное срабатывание его ресурса. Проблема продления ресурса энергомашин приобретает все большее значение в связи с тем, что процессы старения оборудования опережают темпы его замены. Поэтому для обеспечения надежной эксплуатации энергетических агрегатов важное значение имеет расчетная оценка термостойкости и долговечности их элементов, основанная на применении новых методик и расчетных моделей с учетом ряда важных факторов (повреждаемость, неоднородность свойств материала, контактные взаимодействия, наличие трещин, влияние нестационарных температурных полей и т.д.). В работе представлен обзор методического, программного обеспечения и результатов расчетных исследований термостойкости, ресурса и трещиностойкости элементов паровых турбин, выполненных в Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины в течение последних 15 лет. Расчетная оценка ресурса элементов и узлов энергомашин и обоснование возможности его продления проводились в рамках разработанного авторами нормативного документа для определения расчетного ресурса и живучести роторов и корпусных деталей турбин с наиболее обоснованными коэффициентами запаса. Разработанное методическое обеспечение позволило провести расчеты элементов паровых турбин в новых уточненных постановках с учетом особенностей реальных условий эксплуатации. Разработанная компьютеризованная система диагностирования термонапряженного состояния и срабатывания ресурса высокотемпературных роторов паровых турбин, учитывая реальные режимы работы турбоагрегатов, полученные на основе параметров автоматической системы управления технологическими процессами, позволяет более точно оценить сроки их безаварийной эксплуатации. Приведены постановки и краткий анализ результатов рассмотренных задач термостойкости и ресурса элементов турбин.

Ключевые слова: расчетное прогнозирование, термостойкость, ресурс, трещиностойкость, элементы паровых турбин.

Введение

Повышение надежности и работоспособности энергетических агрегатов тесно связано с обеспечением термостойкости их элементов и узлов. Характерной особенностью современной энергетики является эксплуатация оборудования на переменных режимах, что ведет к ускоренному срабатыванию его ресурса. Проблема продления ресурса энергетического оборудования приобретает все большую актуальность в связи с тем, что старение оборудования опережает темпы его замены. Поэтому при прогнозировании надежной эксплуатации энергетических агрегатов важное значение имеет расчетная оценка термостойкости и долговечности их элементов [1], основанная на применении расчетных моделей с учетом ряда определяющих факторов (повреждаемость, неоднородность свойств материала, контактные взаимодействия, наличие трещин, влияние нестационарных температурных полей и т. д.).

Анализ методов расчета термостойкости и ресурса элементов паровых турбин

В Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины разработано методическое обеспечение для расчетной оценки ресурса элементов и узлов энергомашин, а также для обоснования возможности его продления. Причиной поврежденности узлов энергомашин являются,

в основном, малоцикловая усталость, возникающая вследствие большего числа теплосмен, и ползучесть их высокотемпературных элементов. Созданы методики совместного решения трехмерных нестационарных задач теплопроводности и термомеханики на единой конечноэлементной сетке в декартовой или цилиндрической системах координат [1, 2]; расчетной оценки повреждения от ползучести и малоцикловой усталости, учитывающей историю циклического нагружения объекта [3, 4]; расчетной оценки живучести элементов с трещинами [5–8].

Определение термонапряженного состояния осуществляется с учетом зависимости свойств материала от температуры, деформаций пластичности и ползучести с повреждаемостью материала, нестационарных граничных условий теплообмена и термоконтakтного взаимодействия деталей [1, 9, 10]. При термоконтakтном взаимодействии деталей задачи теплопроводности и термомеханики являются связанными через заранее неопределенные условия контактирования. Обе задачи решаются численным интегрированием по времени в сочетании с итерационным процессом. Для его сходимости используются специальные алгоритмы [11]. Учитывается наличие зазоров или натягов между площадками контакта, которые возникают от погрешности изготовления или разности температурного расширения деталей, и контактная проводимость (зависящая от контактного давления, от состояния контактирующих поверхностей и теплопроводности среды, заполняющей зазоры) [1, 12]. Расчет напряженно-деформированного состояния замковых соединений лопаток с диском (и других узлов) в рамках термоконтakтной задачи значительно уточняет результаты, от которых в значительной мере зависят точность и корректность оценки длительной прочности и ресурса элементов турбомашин [13].

Методика расчетной оценки трещиностойкости основана на положениях механики хрупкого разрушения. Учитываются многорежимный характер работы конструкции при статическом и циклическом нагружении, асимметрия цикла, изменение геометрии трещины во времени, релаксация напряжений при ползучести, зависимость свойств материала от температуры, наличие рабочей среды [14, 15] и другие факторы, влияющие на кинетику трещины. При сложном напряженном состоянии в вершине трещины применяется метод конечных элементов и вводится эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений. Рассматриваются подповерхностные или выходящие на поверхность трещины эллиптической формы, или одномерные, характеризующиеся только глубиной. Определяется время живучести конструкции до момента лавинообразного разрушения или прорастания трещины насквозь через стенку детали. Кроме эксплуатационных, учитываются и гипотетические аварийные нагружения (например, угон ротора до определенной величины, повышение давления сверх нормы или нарушение температурного режима).

Наряду с методиками, основанными на положениях хрупкого разрушения, разработано методическое и программное обеспечение для расчета кинетики трещин при циклическом нагружении с использованием параметров рассеянных повреждений материала [8, 16]. В этом случае вместо коэффициентов интенсивности напряжений и кинетических диаграмм роста трещины, требующих сложных испытаний образцов с трещинами, используются диаграммы деформирования и кривые малоцикловой усталости гладких образцов. Дальнейшее развитие этой методики [17–19] потребовало решения упругопластических задач для конструкций с трещиной различной глубины методом конечных элементов, в том числе и с учетом контакта берегов трещины. Это позволило снять ограничения на размер пластической зоны в вершине трещины и асимметрию циклического нагружения.

Хотя живучесть роторов с трещиной не учитывается при оценке ресурса турбин [20], она представляет значительный интерес для определения сроков межремонтного контроля и прогнозирования в наиболее напряженных местах поведения гипотетических трещин, которые могут быть пропущены при осмотрах.

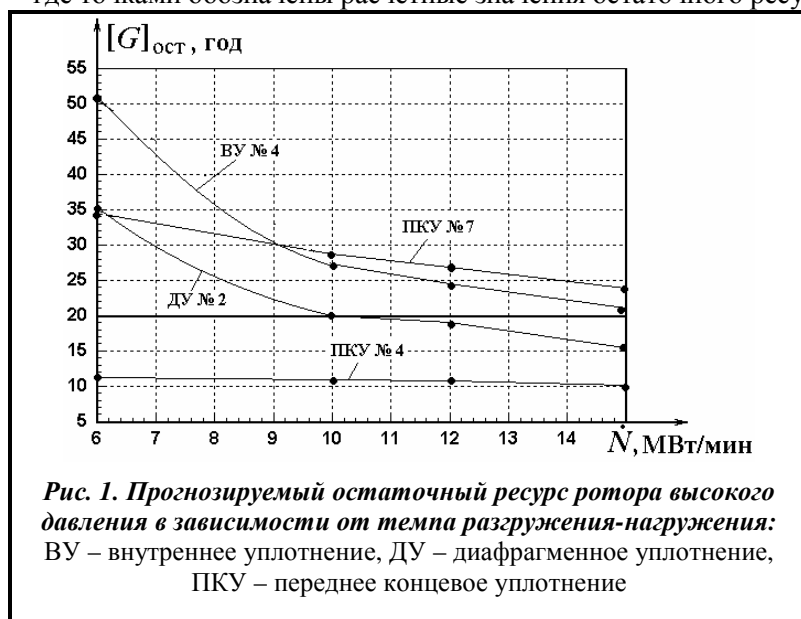
Введение скалярного и векторного параметров поврежденности материала, соответствующих хрупкому и вязкому разрушению, в решение задачи ползучести позволило при оценке длительной прочности высокотемпературных элементов определить время и место начальной стадии разрушения конструкции [3, 21].

При решении задач термоупругости используются справочные данные о механических и теплофизических свойствах материала; для задачи теории пластичности – кривые деформирования образцов; для задачи теории ползучести – кривые ползучести вплоть до разрушения; для оценки длительной прочности при малоцикловом нагружении – кривые малоцикловой усталости; для оценки трещиностойкости – вязкость разрушения материала K_{IC} , а также кинетические диаграммы материала, полученные при испытаниях специальных образцов с трещинами при статических и циклических нагружениях, а в случае использования параметров рассеянных повреждений – упруго-пластического деформирования и кривых усталости материала.

Разработанное программное обеспечение позволило решить следующие важные задачи термомпрочности и ресурса элементов турбоустановок:

- оценка ресурса высокотемпературных роторов высокого и среднего давления турбин К-300-240-2 ХТГЗ и Т-250/300-240 УТМЗ, подверженных действию ползучести и малоциклового усталости [1, 22, 23];
- оценка длительной прочности высокотемпературных зон цельнокованых роторов паровых турбин [3, 24, 25];
- анализ термонапряженного состояния замковых соединений лопаток паровых и газовых турбин различной конструкции с учетом термоконтных взаимодействий в условиях ползучести [11, 13];
- расчет искривления роторов паровых турбин вследствие неоднородности в окружном направлении свойств ползучести и пластичности материала при осесимметричном нагружении [1];
- расчет искривления роторов паровых турбин при неосесимметричных перегревах вследствие задеваний в лабиринтовых уплотнениях [26];
- определение разрушающих чисел оборотов роторов АЭС при угоне с учетом и без учета отрыва лопаток [27, 28];
- анализ кинетики трещин в роторах паровых турбин и высокотемпературных замковых соединениях паровых и газовых турбин [1, 29, 30];
- расчет коробления корпуса паровой турбины при вскрытии цилиндра после длительной эксплуатации в условиях ползучести [31];
- исследование напряженного состояния лопаточного аппарата и осевой жесткости диафрагмы паровой турбины многосеточным методом конечных элементов (МКЭ) с учетом контактных явлений в опирании и дефектов в соединении направляющих лопаток с ободьями [32, 33].

В качестве примера влияния переходных режимов разгрузки-нагрузки, вызванных условиями энергорынка, на ресурс элементов турбины рассмотрен остаточный ресурс ротора высокого давления турбины Т-250/300-240 Харьковской ТЭЦ-5 при различных темпах сброса и набора нагрузки [1]. Проанализировано четырнадцать вариантов переходных режимов. Изучена предыстория работы турбины на момент оценки ресурса, определены граничные условия теплообмена, термонапряженное состояние и повреждаемость на различных режимах работы. Установлены наиболее напряженные и повреждаемые зоны ротора – канавки переднего концевое уплотнения, диафрагменное уплотнение второй ступени и внутреннего уплотнения. Остаточный ресурс на последующий период эксплуатации прогнозировался при условии сохранения среднегодовых режимов работы энергоблока в условиях энергорынка. Рассмотренные варианты переходных режимов разгрузки-нагрузки отличались темпом и их продолжительностью. Прогнозированный остаточный ресурс различных зон ротора в годах в зависимости от темпа разгрузки-нагрузки можно определить по кривым, представленным на рис. 1, где точками обозначены расчетные значения остаточного ресурса $[G]_{\text{ост}}$.



Расчетные исследования показали, что прогнозируемый остаточный ресурс ротора высокого давления турбины лимитирует тепловая канавка № 4 переднего концевое уплотнения. Основной вклад в срабатывание ресурса в зоне переднего концевое уплотнения вносят пуско-остановочные режимы, особенно пуски из горячего состояния и кратковременные остановки без срыва вакуума, а вклад переходных режимов разгрузки-нагрузки незначительный. Причиной ускоренного срабатывания остаточного ресурса в переднем концевом уплотнении ротора при останове без срыва вакуума и пуске из горячего состояния является захолаживание уплотнения паром из коллектора уплотнений.

В зоне первой ступени и близлежащих к нему зонах (диафрагменное уплотнение второй ступени, внутреннее уплотнение) влияние переходных режимов разгрузки-нагрузки более значительно.

Из полученных результатов (рис. 1) следует, что при принятом прогнозируемом среднегодовом режиме работы остаточный ресурс ротора в зоне диафрагменного уплотнения второй ступени при ее ежесуточном разгрузке с 300 до 140 МВт и нагружении с темпом 15 МВт/мин составляет 15 лет, а с темпом 10 МВт/мин – 20 лет. При регламентируемой инструкцией темпе изменения мощности 6 МВт/мин прогнозируемый остаточный ресурс ротора высокого давления составляет 11 лет (тепловая канавка № 4 переднего концевое уплотнения).

Остаточный ресурс ротора высокого давления может быть увеличен до 20 лет при темпе разгрузки-нагрузки 10 МВт/мин, если вдвое сократить количество пусков из горячего состояния (с 5 до 2,5 за год) или принять меры по уменьшению их влияния на поврежденность переднего концевое уплотнения (например, повысить температуру пара в коллекторе уплотнений).

С учетом результатов исследований разработан и введен в действие нормативный документ Министерства энергетики и угольной промышленности Украины по расчетной оценке ресурса высоко-температурных роторов и корпусных деталей паровых турбин ТЭС и ТЭЦ [20]. В нем предложены обновленные расчетные схемы, модели и методы определения термонапряженного состояния, поврежденности материала, оценки ресурса и рекомендации к их определению. Введены новые, менее консервативные, коэффициенты запаса, пересмотрены критерии живучести конструкций с трещинами.

Создана компьютеризированная система диагностирования термонапряженного состояния и оценки срабатывания ресурса от малоциклового усталости и ползучести (счетчик ресурса) в опасных зонах ротора высокого давления турбины Т-250/300-240 [34–36].

Работа счетчика ресурса состоит в автоматизированном определении по архивированным параметрам автоматической системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) режимов работы турбоагрегата и численном моделировании теплового и термонапряженного состояния ротора на протяжении всего времени его работы.

Фактические режимы работы турбоагрегата определяются по следующим параметрам АСУ ТП: скорость вращения ротора, температура, давление и расход острого пара перед стопорными клапанами, активная мощность генератора, температура и давление пара в стационарном коллекторе и давление в конденсаторе.

Предложенный в счетчике ресурса алгоритм определяет поврежденность материала в зонах диагностирования по мере образования циклов и полциклов нагружения в соответствии с методом дождя. Число, время и приращение поврежденности за цикл или полцикл фиксируется в электронных журналах. Счетчик ресурса позволяет учитывать фактические режимы работы турбоагрегата. Для организации его работы не требуется установки дополнительного оборудования. Графический интерфейс позволяет проводить анализ изменения параметров АСУ ТП, температур и эквивалентных напряжений в зонах диагностирования за указанное время. С помощью системы могут определяться шадящие переходные режимы турбоагрегата по прогнозируемым показателям различных режимов работы [37]. Аprobация счетчика ресурса была проведена на турбоагрегате Т-250/300-240 Харьковской ТЭЦ-5.

Одной из причин поломок, аварийных остановов и разрушений роторов агрегатов может быть накопление усталостной поврежденности вследствие интенсивных крутильных колебаний валопровода, которые чаще всего вызваны воздействиями со стороны генератора. Разработано методическое и программное обеспечение для определения прочности и ресурса в наиболее опасных сечениях валопроводов турбоагрегатов при двухфазных и трехфазных коротких замыканиях [38].

Выводы

Оценка ресурса элементов паровых турбин включает в себя расчеты длительной прочности при циклическом нагружении, высокотемпературной ползучести и трещиностойкости материала с учетом влияния нестационарных температурных полей. Расчетное прогнозирование термопрочности и ресурса играет существенную роль для обеспечения безопасной эксплуатации энергетического оборудования.

Литература

1. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термопрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований): моногр. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 370 с.

2. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Протасова Т. В. Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах. *Вестн. НТУ «ХПИ»*. Динамика и прочность машин: Темат. вып. 2005. Вып. 20. С. 151–160.
3. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений. *Проблемы машиностроения*. 2007. Т. 10. № 4. С. 71–80.
4. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Пожидаев А. В., Мамонтов Н. И. Расчетная оценка остаточного ресурса роторов и корпусов паровых турбин. *Энергетика и электрификация*. 2006. № 12. С. 41–51.
5. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Мележик И. И. Оценка живучести высокотемпературных элементов турбомашин с трещинами. *Вестн. НТУ «ХПИ»*. Динамика и прочность машин: Темат. вып. 2004. Вып. 19. С. 153–160.
6. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Мележик И. И. Расчет трещиностойкости элементов конструкций методом конечных элементов. *Вестн. НТУ «ХПИ»*. Динамика и прочность машин: Темат. вып. 2005. Вып. 21. С. 127–132.
7. Shul'zhenko M. G., Gontarovskiy P. P., Garmash N. G., Melezhik I. I., Protasova T. V. Thermally Stressed State and Crack Growth Resistance of Rotors of the NPP Turbine K-1000-60/1500. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 1. P. 114–119. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9197-1>
8. Шульженко М., Гонтаровський П., Гармаш Н., Мележик І. Розрахункове оцінювання розвитку тріщини при циклічному навантаженні з використанням параметрів розсіяних пошкоджень. *Вісн. Терноп. нац. техн. ун-ту*. 2013. № 3(71). С. 197–204.
9. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н., Матюхин Ю. И., Хавин Г. Л. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. Киев: Наук. думка, 1989. 232 с.
10. Гармаш Н. Г. Моделирование термонапряженной посадки турбинного диска на вал. *Вестн. НТУ «ХПИ»*. Новые решения в современных технологиях. 1999. Вып. 47. С. 13–15.
11. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Матюхин Ю. И. Развитие расчетных моделей роторов турбомашин для оценки их термонапряженного и вибрационного состояний. *Вибрации в технике и технологиях*. 2001. № 4 (20). С. 66–69.
12. Шлыков Ю. П., Ганин Б. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М: Энергия, 1977. 328 с.
13. Гармаш Н. Г., Гонтаровский В. П. Напряженное состояние замкового соединения лопаток газовой турбины в рамках термоконтактной задачи. *Проблемы машиностроения*. 2001. Т. 4. № 3–4. С. 66–69.
14. Мележик И. И., Гонтаровский П. П., Шульженко Н. Г. Оценка влияния влажно-паровой среды на кинетику трещин в сосудах энергооборудования. *Вестн. двигателестроения*. 2011. № 2. С. 175–178.
15. Шульженко М., Гонтаровський П., Мележик І. Оцінювання впливу агресивного середовища на кінетику тріщин в елементах енергообладнання. *Машинознавство*. 2011. № 3–4 (165–166). С. 45–49.
16. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Мележик И. И. Оценка развития трещины при многоциклическом нагружении на основе анализа рассеянных повреждений материала. *Проблемы машиностроения*. 2015. Т. 18. № 4/2. С. 54–58.
17. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Мележик І. І. Оцінка розвитку тріщини при циклічному навантаженні пластинчатих елементів із використанням параметрів розсіяних пошкоджень матеріалу. *Вісн. НТУ «ХПИ»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Х.: НТУ «ХПИ», 2017. № 9(1231). С. 41–44. doi: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.09.06>.
18. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Мележик І. І. Розрахункова оцінка розвитку тріщини з контактними берегами в плоских елементах конструкцій. *Вісн. Запоріж. нац. ун-ту*. Фізико-математичні науки. 2017. № 1. С. 365–373.
19. Гонтаровский П. П., Шульженко Н. Г., Гармаш Н. Г., Мележик И. И. Моделирование роста кольцевой трещины в цилиндрическом элементе конструкции при циклическом нагружении. *Вісн. НТУ «ХПИ»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Х.: НТУ «ХПИ», 2018. № 12 (1288). С. 62–66. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.201812.11>
20. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І., Мележик І. І., Пожидаєв О. В. Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін. Методичні вказівки: СОУ- Н МЕН 40.1–21677681– 52:2011. К.: ОЕП «ГРІФРЕ»: М-во енергетики та вугільної пром-сті України, 2011. 42 с.
21. Shul'zhenko N. G., Gontarovskii P. P., Matyukhin Yu. I., Garmash N. G. Numerical Analysis of the Long-Term Strength of the Rotor Disks of Steam Turbines. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 4. P. 418–425. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9232-2>
22. Шульженко Н. Г., Пожидаев А. В., Глядя А. А., Дедов В. Г. Расчетная оценка остаточного ресурса роторов высокого и среднего давления турбин К-300-240 ХТГЗ ст. № 1–4 Запорожской ТЭС. *Проблемы машиностроения*. 2004. Т. 7. № 4. С. 3–11.

23. Шульженко М. Г., Матюхін Ю. І., Гармаш Н. Г., Пожидаєв О. В., Гонтаровський В. П. Методика оперативної оцінки пошкодженості матеріалу ротора турбіни при циклічному навантаженні і повзучості. *Проблеми машиностроєння*. 2011. Т. 14. № 5. С. 46–52.
24. Шульженко Н. Г., Матюхін Ю. І., Гонтаровський В. П. О длительной прочности высокотемпературной зоны осевого канала роторов паровых турбин. *Проблеми машиностроєння*. 2002. Т. 5. № 1. С. 9–16.
25. Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І. Ресурс диска паровой турбины с начальными дефектами в области разгрузочных отверстий при ползучести. *Проблеми машиностроєння*. 2015. Т. 18. № 2. С. 3–10.
26. Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Протасова Т. В. Влияние тепловых канавок на деформацию цельнокованого ротора при местных неосесимметричных перегревах. *Проблеми машиностроєння*. 2006. Т. 9. №4. С. 84–89.
27. Shul'zhenko N. G., Gontarovskii P. P., Protasovsa T. V. Influence of the Circumferential Non-Uniformity in the Material Mechanical Properties on the Deformation of the Rotors of Power-Generating Units. *Strength of Materials*. 2014. Vol. 46. Iss. 4. P. 483–492. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9573-3>
28. Шульженко Н. Г., Матюхін Ю. І., Гонтаровський П. П., Гришин Н. Н. Оценка разрушающего числа оборотов ротора турбоагрегата АЭС. *Проблеми машиностроєння*. 2004. Т. 7. № 1. С. 55–60.
29. Мележик И. И., Гонтаровський П. П., Шульженко Н. Г. Расчетная оценка трещиностойкости грибовидного замкового соединения лопатки с диском паровой турбины. *Физические и компьютерные технологии*: тр. 14-й междунар. науч.-техн. конф. Харьков: Харьк. машиностроит. завод «ФЭД». 2008. С. 478–481.
30. Гецов Л. Б., Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Мележик И. И. Оценка трещиностойкости многоопорных замковых соединений лопаток газотурбинной установки ГТК-10-4. *Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования*. Тр. НПО ЦКТИ. 2009. Вып. 296. С. 355–363.
31. Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І., Гармаш Н. Г. Анализ формоизменения высокотемпературной части корпуса турбины после длительной эксплуатации. *Проблеми машиностроєння*. 2008. Т. 11. № 3. С. 15–23.
32. Зайцев Б. Ф., Шульженко Н. Г., Асаенко А. В. Напряженно-деформированное состояние и контактные явления в опирании диафрагмы паровой турбины. *Проблеми машиностроєння*. 2006. Т. 9. № 3. С. 35–45.
33. Shul'zhenko N. G., Zaitsev B. F., Asaenok A. V., Protasova T. V. Deformation and Vibration-Induced Stress Intensity of a High-Temperature Turbine Rotor with a Breathing Transverse Crack. *Strength of Materials*. 2017. Vol. 49. Iss. 6. P. 751–759. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9920-x>
34. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І., Гармаш Н. Г., Гонтаровський В. П. Система діагностики термонапруженого стану і спрацювання ресурсу ротора високого тиску турбіни Т-250/300-240 на стаціонарних та змінних режимах роботи. *Проблеми машиностроєння*. 2013. Т. 16. № 6. С. 8–14.
35. Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Матюхін Ю. І., Гармаш Н. Г., Гонтаровський В. П. Автоматизированная оценка срабатывания ресурса высокотемпературного ротора турбины. *Вісн. НТУ «ХПІ»*. Сер. Енергетичні та теплофізичні процеси й устаткування. Х.: НТУ «ХПІ», 2014. № 13(1056). С. 39–45. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9573-3>
36. Шульженко Н. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Ефремов Ю. Г. Диагностирование термонапряженного состояния и оценка срабатывания ресурса роторов высокого и среднего давления турбины Т-250/300-240. *Вісн. НТУ «ХПІ»*. Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Х.: НТУ «ХПІ». 2015. № 16 (1125). С. 32–37.
37. Шульженко Н. Г., Гармаш Н. Г., Гонтаровський В. П. Оценка щадящих режимов эксплуатации по термонапряженному состоянию высокотемпературного ротора. *Авиац.-косм. техника и технология*. 2012. № 8(95). С. 160–164.
38. Shul'zhenko N. G., Gontarovskii P. P., Garmash N. G., Grishin N. N. Torsional Vibrations and Damageability of Turboset Shafts under Extraordinary Generator Loading. *Strength of Materials*. 2015. Vol. 47. Iss. 2. P. 227–234. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9652-0>

Поступила в редакцию 23.05.18