

расхода условного топлива на тепловых электростанциях равного 0,410 кг/кВт\*ч).

Имеющийся у предприятия ГП НПКГ "Зоря" - "Машпроект" опыт газотурбостроения в целом, а также приобретенный опыт по проектированию и вводу в эксплуатацию детандер-генераторных установок является уникальным и позволяет рекомендовать потенциальным заказчикам производимые ДДГ для объектов даже с самыми высокими требованиями к безопасности и надежности работы указанных установок.

*Розглядаються розроблені методики розрахункового дослідження термонапруженого стану й оцінки ресурсу з урахуванням живучості високотемпературних елементів енергомашин. Основу методик складають розв'язки нестационарних задач теплопровідності, термомеханіки й механіки крихкого руйнування. Наводяться приклади розв'язаних задач*

*Ключові слова: термонапружений стан, ресурс, енергомашина*

*Рассматриваются разработанные методики расчетного исследования термонапряженного состояния и оценки ресурса с учетом живучести высокотемпературных элементов энергомашин. Основу методик составляют решения нестационарных задач теплопроводности, термомеханики и механики хрупкого разрушения. Приводятся примеры решенных задач*

*Ключевые слова: термонапряженное состояние, ресурс, энергомашина*

*The developed techniques of settlement research of a thermostressed state and life estimation taking into account survivability of high-temperature elements of power machinery are considered. The basis of techniques is made by solutions of non-stationary problems of heat conductivity, thermomechanics and mechanics of brittle failure. Examples of the solved problems are presented*

*Key words: thermostressed state, lifetime, power machinery*

## Литература

1. Сперкач И.Е. Перспективы внедрения газовых утилизационных бескомпрессорных турбин // Сталь. – 2004. – №2. – С. 2-4.
2. Кройцхубер П. Утилизация энергии в результате использования газовой расширительной турбины на заводе в Кошице// Черные металлы. – 1997. – Июнь. – С. 41-45.
3. Сазанов Б.В. Доменные газотурбинные установки. - М.: Металлургия. – 1965.
4. Технические условия ТУ 24-2-341-71. Турбина газовая утилизационная бескомпрессорная типа ГУБТ.
5. Газ доменный ОРД 14.587-1-90.

УДК 621.165:539.4

# ЗАДАЧИ ТЕРМОПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОУСТАНОВОК

**Н. Г. Шульженко**

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом\*

**П. П. Гонтаровский**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

**Ю. И. Матюхин**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

\*Отдел вибрационных и термомеханических исследований

ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины

## 1. Введение

Проблема обеспечения надежной работы паровых и газовых турбин приобретает все большую актуальность в связи с тем, что старение оборудования опере-

жает темпы его замены. Решение этой задачи в первую очередь требует наличия современных методов оценки и контроля технического состояния исследуемых объектов по прочностным параметрам. В Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН

Украины создано методическое обеспечение расчетных исследований теплового, напряженно-деформированного состояния и оценки ресурса элементов и узлов энергомашин, работающих в экстремальных условиях. Ведутся работы по созданию расчетных методик диагностирования термонапряженного состояния турбоагрегатов.

В данной работе излагаются вопросы методического и программного обеспечения расчетов тепловых полей, термонапряженного состояния с учетом деформаций пластичности и ползучести, накопления повреждений ползучести и малоциклового усталости, трещиностойкости и оценки ресурса турбоагрегатов, которые решались в последние годы отделом вибрационных и термочувствительных исследований.

---

## 2. Расчетные методики оценки термочувствительности и ресурса

---

Для оценки термонапряженного состояния и ресурса высокотемпературных элементов турбоустановок разработаны методики, реализованные в программных комплексах, базирующихся на методе конечных элементов. Рассматриваются плоские осесимметричные и трехмерные нелинейные нестационарные задачи теплопроводности и термомеханики в декартовой и цилиндрической системах координат [1-3]. Нестационарные температурные поля и напряженно-деформированное состояние (НДС) определяются единым программным комплексом на общей конечноэлементной сетке.

В задаче теплопроводности граничные условия 2-го и 3-го рода и теплообмен через излучение могут произвольно изменяться по поверхности тела и по времени. Кроме того, могут иметь место объемные источники или стоки тепла. Начальным условием может служить как заданное температурное поле, так и полученное в результате решения стационарной задачи теплопроводности при соответствующих граничных условиях.

В задаче термомеханики учитываются температурные деформации, деформации пластичности и ползучести с учетом повреждаемости материала. На части поверхности рассчитываемого объекта могут быть заданы напряжения, а на другой части поверхности – перемещения или смешанные граничные условия, а также объемные нагрузки (центробежные, инерционные), переменные во времени. Свойства материала предполагаются зависящими от температуры.

Расчет установившейся ползучести может быть выполнен по алгоритму решения упругопластической задачи с использованием изохронных кривых ползучести для заданных моментов времени. Кинетику НДС позволяют проследить расчеты с использованием теории течения и теории типа течения с анизотропным упрочнением [1].

Задачи теории ползучести с анизотропным упрочнением, дополненной кинетическими уравнениями повреждаемости материала, решаются с использованием явных и неявных схем интегрирования по времени с автоматизированным выбором шага. Учет разнородности при растяжении-сжатии и исходной анизотропии материала позволяет рассма-

тривать ползучесть деталей турбин, выполненных из композиционных материалов или сплавов, полученным методом направленной кристаллизации.

Для учета повреждаемости используется скалярный параметр, отвечающий за вязкое разрушение, и векторный параметр, отвечающий за хрупкое разрушение. При достижении одним из параметров значения единицы исчерпывается длительная прочность материала в точке тела, т.е. заканчивается скрытый период накопления повреждений. Учет рассеянных повреждений в процессе решения задачи термомеханики позволяет получить картину повреждений материала во времени, по которой можно определить место, время и характер начала разрушения конструкции [4].

При необходимости учитывается термосиловой контакт между деталями, который приводит к связанности решения задачи теплопроводности и термомеханики через заранее неизвестные условия контактного взаимодействия. Решение термоконтальной задачи определяется из совместного итерационного процесса, для сходимости которого необходимо часто применять специальные средства [5]. Такие задачи возникают при расчетах корпусов с фланцами горизонтального разреза, дисков, посаженных на вал с натягом, многоопорных замковых соединений лопаток с дисками. При этом учитывается наличие зазоров (натягов) между площадками контакта, которые возникают за счет погрешностей изготовления или разности коэффициентов температурного расширения материалов деталей, контактная проводимость, зависящая от контактного давления, состояния контактирующих поверхностей и теплопроводности среды, заполняющей зазоры и другие факторы [6]. Для контактирующих элементов могут быть выбраны разные расчетные схемы, когда, например, диск рассматривается в рамках осесимметричной задачи, а хвостовик лопатки – в рамках плоской, что невозможно при использовании известных универсальных программных комплексов.

Нестационарные режимы в период пуска турбины увеличивают неравномерность распределения нагрузки между зубцами замкового соединения за счет более быстрого прогрева хвостовика лопатки [5]. Расчет НДС замковых соединений и других деталей в рамках термоконтальной задачи значительно уточняет результаты, от которых в большой мере зависят точность и корректность оценки длительной прочности и ресурса элементов турбомашин [6].

Для оценки неосесимметричных деформаций роторов разработаны методика и программный комплекс на основе решения нестационарных трехмерных задач теплопроводности и термомеханики с учетом деформаций пластичности и ползучести полуаналитическим методом конечных элементов в цилиндрической системе координат [2]. Учет неоднородности свойств пластичности и ползучести материала в окружном направлении позволил решить новые задачи неосесимметричного деформирования тел вращения под действием осесимметричной нагрузки.

Созданное методическое обеспечение используется для моделирования температурных полей и кинетики НДС элементов энергомашин при пусковых, остановочных, переменных и стационарных режимах работы. По размахам напряжений и деформаций

оценивается поврежденность материала при циклическом нагружении, что позволяет при данных условиях эксплуатации определить время до появления трещин малоциклового усталости в концентраторах напряжений.

В случае необходимости в рамках механики хрупкого разрушения анализируется подрастание трещины во времени вплоть до момента лавинообразного разрушения или прорастания трещины насквозь стенки детали [7]. Учитывается многорежимный характер эксплуатации конструкции при статическом и циклическом нагружении. При этом используются коэффициенты интенсивности напряжений отрыва и поперечного или продольного сдвига, по которым вычисляется эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений, отвечающий за кинетику трещины. Трещины могут быть подповерхностными или выходящими на поверхность эллиптической формы в плане, а также одномерные трещины, характеризующиеся только глубиной.

Для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений используется интерполяционная методика Овчинникова А.В. или метод конечных элементов. Наряду с эксплуатационными нагрузками могут учитываться и известные аварийные нагружения (например, угон ротора до определенной величины или нарушение температурного режима, повышение давления сверх нормы), которые могут никогда и не произойти, но при возникновении которых, конструкция не должна разрушиться.

В результате расчета кинетики трещины определяется время трещиностойкости (живучести) конструкции с конкретной трещиной. Время живучести для некоторых элементов энергомашин, например, корпусных деталей паровых турбин, включается в общий ресурс конструкции, а для роторов – нет, ввиду катастрофических последствий их разрушения.

Разработанное методическое обеспечение может быть использовано как на этапе проектирования, так и для оценки ресурса работающего или модернизируемого оборудования.

Для использования методического обеспечения необходимы следующие справочные данные по свойствам материалов при соответствующих температурах.

Для решения задач термоупругости необходимы данные о теплофизических и механических 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 малоциклового усталости; для оценки трещиностойкости – вязкость разрушения материала  $K_{1c}$ , а также кинетические диаграммы материала, полученные при испытаниях специальных образцов с трещинами при статических и циклических нагружениях.

### 3. Результаты исследований

С помощью разработанного методического обеспечения решены следующие важные задачи оценки термочувствительности и ресурса элементов турбоустановок:

- оценка ресурса высокотемпературных роторов паровых турбин, подверженных действию ползучести и малоциклового усталости [8,9];
- оценка длительной прочности высокотемпературных зон цельнокованных роторов паровых турбин [4,10];
- анализ термонапряженного состояния замковых соединений лопаток паровых и газовых турбин различной конструкции с учетом термоконтактных взаимодействий в условиях ползучести [1,5,6];
- расчет процесса тепловой посадки диска на вал с натягом и его освобождение под действием центробежных сил с учетом и без учета трения [1,11];
- расчет искривления роторов паровых турбин вследствие неоднородности в окружном направлении свойств ползучести и пластичности материала при осесимметричном нагружении [12,13];
- расчет искривления роторов паровых турбин при неосесимметричном перегреве вследствие задевания в лабиринтовых уплотнениях [14];
- определение разрушающих чисел оборотов роторов АЭС при угоне с учетом и без учета отрыва лопаток [15,16];
- анализ кинетики меридиональных и поперечных трещин в роторах паровых турбин [7,17];
- анализ кинетики трещин в высокотемпературных замковых соединениях паровых и газовых турбин [18,19];
- расчет коробления корпуса паровой турбины при вскрытии цилиндра после длительной эксплуатации в условиях ползучести [20];
- исследование напряженного состояния лопаточного аппарата и осевой жесткости диафрагмы паровой турбины многосеточным МКЭ с учетом контактных явлений в опирании и дефектов в соединении направляющих лопаток с ободьями [21,22].

### 4. Выводы

Рассмотренное методическое обеспечение позволяет решать комплекс задач термочувствительности, необходимых для расчетной оценки ресурса элементов турбоустановок. Выполненные разработки могут быть использованы для моделирования тепловых полей, напряженно-деформированного состояния и оценки ресурса как вновь создаваемого, так и эксплуатируемого энергооборудования.

### Литература

1. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
2. Шульженко Н.Г., Гонтаровский В.П., Протасова Т.В. Применение полуаналитического метода конечных элементов для решения трехмерных задач термомеханики в цилиндрических координатах // Вісник НТУ «ХП», 2004. – № 20. – С. 151–160.
3. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И., Гармаш Н.Г. Моделирование кинетики трехмерных термомеханических полей в элементах турбомашин //

- Вибрации в технике и технологиях, 2004.– № 6 (38). – С. 26–30.
4. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И. Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений // Проблемы машиностроения, 2007. – 10, № 4. – С. 71–81.
  5. Гармаш Н.Г., Гонтаровский П.П. Напряженное состояние замкового соединения лопаток газовой турбины в рамках термоконтактной задачи // Проблемы машиностроения, 2001. – 4, № 3-4. – С. 12–16.
  6. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И.. Развитие расчетных моделей роторов турбомашин для оценки их термонапряженного и вибрационного состояния // Вибрации в технике и технологиях, 2001.– № 4 (-20). – С. 66–69.
  7. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И. Оценка живучести высокотемпературных элементов турбомашин с трещинами // Вестник НТУ «ХПИ», 20-04. – № 19. – С. 153–160.
  8. 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 // Пробл. машиностроения, 2004.– 7, № 4. – С. 3–11.
  9. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И., Гармаш Н.Г. Анализ термонапряженного состояния ротора турбины К-300-240 ХТГЗ для различных пусковых режимов // Проблемы машиностроения, 2007. – 10, № 1. – С. 83–90.
  10. Шульженко Н.Г., Матюхин Ю.И., Гонтаровский В.П. О длительной прочности высокотемпературной зоны осевого канала роторов паровых турбин // Пробл. машиностроения, 2002.–5, № 1.– С. 9 – 16.
  11. Гармаш Н.Г. Моделирование термонапряженной посадки турбинного диска на вал // Новые решения в современных технологиях. Вестник Харьк. гос. политехн. у-та.- Харьков: ХГПУ, 1999.- Вып. 47.- с. 13-15.
  12. Шульженко Н.Г., Матюхин Ю.И., Гонтаровский В.П., Протасова Т.В. Оценка прогрессирующего искривления высокотемпературных роторов при окружной неоднородности их свойств // Авиационно-космическая техника и технология, 2005.– № 9 (25). – С. 73–77.
  13. Шульженко Н.Г., Гонтаровский В.П., Протасова Т.В. Искривление роторов турбомашин при окружной неоднородности свойств материала // Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – Киев: Институт проблем прочности НАН Украины, 2008. – № 31 – С. 170–177.
  14. Шульженко Н.Г., Гонтаровский В.П., Протасова Т.В. Влияние тепловых канавок на деформацию цельнокотанованного ротора при местных неосесимметричных перегревах // Пробл. машиностроения, 2006. – 9, № 4.– С. 84–89.
  15. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И., Гришин Н.Н. К разрушению роторов паровых турбин при их угоне // Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання: Зб. наук. праць. – Харків: Ін-т пробл. машинобудування НАН України, 2003.–Т. 2. – С. 384–387.
  16. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И., Гришин Н.Н. Оценка разрушающего числа оборотов ротора турбоагрегата АЭС // Пробл. машиностроения, 2004. – 7, № 1.– С. 55–60.
  17. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И. Расчетная оценка трещиностойкости элементов роторов турбомашин // Вестник двигателестроения, 2008.– № 3. – С. 58–63.
  18. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И. Оценка трещиностойкости многоопорных замковых соединений лопаток газовых турбин // Проблемы прочности, 2008. – № 5. – С. 89 – 95.
  19. Мележик И.И., Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Расчетная оценка трещиностойкости грибовидного замкового соединения лопатки с диском паровой турбины // Физические и компьютерные технологии: труды 14-й междунар. науч.-техн. конфер. 24–25 сентября 2008. –Харьков: ХПНК "ФЭД", 2008.– С. 478–481.
  20. Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Матюхин Ю.И., Гармаш Н.Г. Анализ формоизменения высокотемпературной части корпуса турбины после длительной эксплуатации // Пробл. машиностроения, 2008. – 11, № 3.– С. 15–23.
  21. Зайцев Б.Ф., Шульженко Н.Г., Асаенок А.В. Напряженно-деформированное состояние и контактные явления в опирании диафрагмы паровой турбины // Пробл. машиностроения, 2006. – 9, № 3.– С. 35–45.
  22. Шульженко Н.Г., Зайцев Б.Ф., Асаенок А.В. Оценка прочности сварной диафрагмы паровой турбины в трехмерной постановке // Надійність і довговічність машин і споруд, 2006.– вип. 27.– С. 174–180.