

УДК 631.7.04-197:631:7.019.15

**В.О. ПОВГОРОДНИЙ***Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт им. Н.Е. Жуковского», Украина***СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**

*Целью создания алгоритмов и систем контроля термонапряженного состояния оборудования РУ является организация обработки экспериментальной и экспериментально-расчетной информации о процессах реального нагружения элементов и узлов конструкции при ее эксплуатации для контроля и учета накопленных в металле повреждений. Использование полученной экспериментальной информации носит в ряде случаев косвенный характер и необходимо для проверки и верификации применяемых алгоритмов, построенных на базе методов решения обратных задач термоупругости и теплопроводности, выбора конкретных расчетных методик и параметров регуляризации получаемых решений.*

**Ключевые слова:** температура, обратная задача, термоупругость, критерий, материал.

**Введение**

Одной из задач обеспечения прочности и повышения ресурса оборудования АЭС является определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и узлов турбин в реальных условиях эксплуатации, допускающих нестационарные температурные воздействия на оборудование.

Прямое тензо-термометрирование внутренних поверхностей патрубков, являющихся наиболее нагруженными в условиях нестационарных температурных воздействий, практически не может быть реализовано в натуральных условиях для большинства интересующих случаев вследствие специфики работы реакторного оборудования. Поэтому, для определения термоупругих напряжений целесообразно применение расчетных методов — обратных задач теплопроводности и термоупругости, предполагающих восстановление нестационарных граничных условий на внутренней поверхности конструкции по данным распределения температур и теплового потока (либо кольцевых напряжений) на наружной поверхности.

**Постановка задачи**

Начиная с 2007 года, в связи с необходимостью обобщения данных последних пусконаладочных циклов натуральных исследований термомеханики конструкций АЭС повышенной безопасности, лабораторией систем измерения и технической диагностики оборудования некоторыми предприятиями (в частности, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Россия) освоен разработанный институтом машиноведения РАН совместно со специалистами этого пред-

приятия программный комплекс «Inverse» прикладных решений различных классов обратных задач теплопроводности и термоупругости.

Целью настоящей работы является изучение возможностей вышеупомянутого программного комплекса, определение области его применимости на примере обработки данных натурных испытаний АЭС повышенной безопасности, а также предварительная проверка комплекса сравнением расчетов с методикой обработки результатов контроля температур и давления в элементах оборудования реакторных установок. А также на базе специально спроектированной лабораторной установки исследовано термонапряженное состояние методической модели трубопровода РУ ВВЭР для определения погрешностей восстановления на внутренней поверхности конструкции температурных граничных условий и кольцевых термоупругих напряжений. Для принятия решения об окончательной верификации и решения обратных задач термоупругости и теплопроводности был разработан программный комплекс «Inverse».

**Проблематика обратной задачи**

Решаемое программным комплексом «Inverse» интегральное уравнение Вольтера первого рода (1) с условиями (2), к которому сводится обратная задача теплопроводности, решение является неустойчивым относительно погрешностей исходных данных [1]:

$$\int_0^t B(t-\tau) \cdot T(\tau) d\tau = T^*(t) - T^0(t), \quad 0 \leq \tau \leq t \leq t_0, \quad (1)$$

где  $T(\tau)$  — искомая температура на внутренней поверхности;

$T^*(t)$  – замеренные величины температуры на наружной поверхности;

$T_0(t)$  – температура на наружной поверхности, соответствующая краевой задаче:

$$\begin{aligned} \chi \nabla^2 T &= \partial T / \partial \tau, \quad 0 \leq \tau \leq t_0 \\ T|_k &= \partial T^*(t) / \partial n, \quad T|_l = 0, \\ T|_{\tau=0} &= \theta^*(\tau). \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, распределение температуры внутренней поверхности реакторного оборудования содержит небольшие флуктуации, которые могут быть обусловлены высокочастотными синусоидальными составляющими плотности теплового потока. При решении прямой задачи теплопроводности распределения с различными флуктуациями могут породить практически неотличимые друг от друга температуры наружной поверхности. Это означает, что обратная задача теплопроводности не имеет единственного решения, поэтому, сведение некорректно-поставленной задачи к корректно-поставленной отвечало физически реализуемым условиям теплопередачи. Задача обеспечения безопасной эксплуатации атомных энергетических установок типа ВВЭР также связана с использованием диагностических систем косвенного контроля нагруженности элементов, подвергающихся интенсивным тепловым воздействиям со стороны теплоносителя с меняющейся температурой. Необходимость использования подобных систем диагностики определяется существенными отличиями реальных условий термосилового нагружения оборудования от расчетных моделей, принятых на этапе выполнения проектных расчетов на прочность. Кроме того, целью создания алгоритмов и систем контроля термонапряженного состояния оборудования РУ является организация обработки экспериментальной и экспериментально-расчетной информации о процессах реального нагружения элементов и узлов конструкции при ее эксплуатации для контроля и учета накопленных в металле повреждений. Таким образом, система контроля напряженного состояния является составной частью, или подсистемой штатной системы контроля остаточного ресурса АЭС. Сложность создания подобных систем связана с невозможностью получения прямой экспериментальной информации о деформациях и напряжениях в наиболее опасных точках конструкции, расположенных, как правило, в зонах труднодоступных для установки первичных преобразователей – в зонах концентрации напряжений и на внутренних поверхностях, подверженных воздействию потоков теплоносителя. Современные же средства экспериментального кон-

троля напряжений в натурной конструкции (тензорезисторные преобразователи) не обеспечивают длительного получения необходимой информации в условиях реальной эксплуатации энергоблока из-за недостаточной стойкости к воздействию высоких температур, а также механического и коррозионного повреждения. Поэтому, существующие и создаваемые системы диагностики напряженного состояния должны использовать косвенную экспериментальную информацию, получаемую по сигналам штатной службы энергоблока и по сигналам специальных датчиков температур и перемещений, предусмотренных специально для использования в системе контроля термонапряженного состояния. Количество и схема расположения этих датчиков полностью определяются особенностями применяемых расчетных методов и алгоритмов и имеют определяющее значение для достоверного определения напряжений в наиболее нагруженных зонах. К настоящему времени разработаны различные варианты построения систем контроля напряженного состояния, использующих сигналы штатных систем термоконтроля АЭС, результаты пусконаладочных измерений (в том числе данные, полученные методами тензометрии), результаты предварительного расчетного анализа и базирующиеся на применении различных алгоритмов расчета напряжений в контрольных точках. Одной из первых попыток создания подобных систем на Украине было использование на 1-м блоке Запорожской АЭС опытной системы контроля усталостного повреждения, основанной на использовании регрессионных зависимостей напряжений от изменения штатных эксплуатационных параметров. Регрессионные зависимости устанавливались на основе анализа результатов, полученных методом натурной тензометрии в начальный период пуска энергоблока. Недостатком подобной системы является чисто вероятностный характер получаемых значений напряжений в контрольных точках, что не позволяет получать гарантированных оценок накопленных повреждений и остаточного ресурса. Другим подходом как раз и является использование данных постоянного экспериментального контроля и расчетных моделей, связывающих параметры нагружения (давления, температуры, силовые факторы) с напряженным состоянием в наиболее нагруженных точках. На подобном принципе построены многие зарубежные системы – «FAMOS» (ФРГ), «ALLY» (США). В России, как уже было сказано, наиболее удачным решением является созданная совместно ОКБ «Гидропресс» и ВНИИ АЭС система «САКОР-М», реализуемая на ряде российских и зарубежных АЭС.

В системе «САКОР-М» принята, основанная на некоторых допущениях, следующая расчетная модель зависимости напряжений в контрольных точках от параметров состояния РУ и отдельных ее узлов [2], в которой используются: напряжения от веса, затяга, монтажа и остаточные напряжения; напряжения от давления первого и второго контуров; напряжения от непроектных перемещений; компенсация от температурного расширения; напряжения от стратификации; местные напряжения при стационарном нагреве; базовая функция интеграла Дюамеля, характеризующая напряжения от изменения температуры (термопульсации и термоудары); температуры теплоносителей на к-й границе поверхности; текущее время.

Для определения каждого из слагаемых приведенной формулы необходимо использовать как результаты предварительных и уточненных расчетов, так и в максимально возможной степени – результаты, полученные методами натурной тензометрии на этапе проведения пуско-наладочных измерений. Использование полученной экспериментальной информации носит в ряде случаев косвенный характер и необходимо для проверки и верификации применяемых алгоритмов, построенных на базе методов решения обратных задач термоупругости и теплопроводности, выбора конкретных расчетных методик и параметров регуляризации получаемых решений. В то же время выбор алгоритмов решения обратных задач, их адаптация под реальные режимы эксплуатации, настройка системы должны включать проведение вычислительных экспериментов, основанных на использовании методологии обратных задач. А также, необходимо численное моделирование, проводимое на этапе проектирования системы измерений для оптимизации мест расположения датчиков на конструкции на этапе обработки экспериментальных данных, необходимое для обеспечения достоверности конечных результатов.

Важной особенностью обратных задач тепловой диагностики является их математическая некорректность. Это связано с тем, что обратные задачи описывают модели физически необратимых процессов, в которых нарушаются причинно-следственные отношения. Некорректность задачи ставить высокие требования к анализу имеющейся исходной информации, выбору методов решения и методике обработки экспериментальных данных. Особую роль приобретают вопросы единственности решения, которые во многих случаях являются весьма существенными при анализе получаемых решений. В обратных задачах с достаточной достоверностью на основе физических соображений

можно предположить существование решения при точных исходных данных, но его единственность не всегда очевидна, так как один и тот же отклик исследуемой системы может вызываться различными причинами. Анализ же условий единственности решения обратных задач позволяет сформулировать требования к условиям проведения экспериментальной части исследования, интерпретация данных которой проводится с помощью решения обратных задач. Когда решение обратной задачи не единственно, регуляризирующие алгоритмы позволяют уточнить априорные оценки искомых решений, если обеспечивается близость получаемых приближений к нормальному решению относительно начального приближения решения обратной задачи, которое заведомо ближе к истинному, чем априорная оценка. Все методы решения обратных задач можно разделить на универсальные и проблемно-ориентированные. К универсальным методам относятся алгоритмы, использующие лишь информацию самого общего характера и пригодные для решения самого широкого класса задач, например вариационный метод А.Н.Тихонова [2]. К проблемно-ориентированным относятся методы, в которых существенно учитывается специфика решаемой задачи. Проблемно-ориентированные методы имеют существенно более узкую область применения, предъявляют довольно жесткие требования к условиям проведения эксперимента, но в своей области применения они превосходят универсальные методы (алгоритмическая простота учета априорной информации, быстрое действие, точность и т. п.). Поэтому, создавая систему диагностики (неразрушающего контроля) конкретной механической системы необходимо сформулировать требования к получаемой информации, а также ясно представлять возможности системы измерений, с точки зрения полноты и достоверности первичной экспериментальной информации, и исходя из этого сформулировать требования к вычислительной части, использующей те или другие алгоритмы интерпретации исходных данных. Исходя из этого, исследователю желательно иметь в своем распоряжении комплекс программ универсальных и проблемно-ориентированных методов решения подобного плана обратных задач. Далее задача оптимального планирования эксперимента. Во многих случаях задачу оптимального планирования эксперимента можно сформулировать как задачу выбора условий проведения эксперимента и схемы измерений из условий обеспечения минимального значения числа обусловленности оператора задачи. Вычислительные свойства алгоритмов решения обратных задач могут быть в значительной сте-

пени улучшены за счет рационального выбора параметров схемы измерений. Главная цель эксперимента в задачах диагностики тепловых состояний должна состоять в получении экспериментальной информации, обеспечивающей восстановление искомых параметров с требуемой, а в ряде случаев с максимальной возможной точностью. Используемые методы решения обратных задач должны включать в свои алгоритмы только ту экспериментальную информацию, которая получается в реальном эксперименте. На практике часто невозможно получить достоверные экспериментальные данные во всей интересующей исследователя области тела. В таких случаях исходные данные конкретной обратной задачи формируются на основании измерений в минимально необходимом количестве точек. Вычислительные алгоритмы в этих случаях должны создаваться лишь исходя из полученной минимальной экспериментальной информации, и не должны вовлекать некоторую домысливаемую информацию, не связанную с реальными измерениями.

Области целесообразного практического применения методологии обратных задач при создании диагностических систем тепловых машин приводят к сужению возможностей оптимального выбора условий проведения эксперимента. Наиболее эффективным является применение методов обратных задач в тех диагностических системах, которые обслуживают ситуации, в которых традиционные методы диагностики не позволяют достичь требуемой точности или вовсе не применимы. К таким ситуациям несомненно относится рассматриваемая ситуация диагностики тепловых параметров в условиях эксплуатации объекта, когда недоступные для размещения измерительных средств зоны конструкции необходимо контролировать для предотвращения возникновения аварийных значений эксплуатационных параметров. В качестве примера была рассмотрена задача восстановления значений напряжений и температур на внутренней поверхности патрубка аварийной питательной воды парогенератора (ПГ) при эксплуатации в режиме сброса нагрузки турбогенератора до нуля, демонстрирующая возможности получения дополнительной информации по напряжениям и температурам на внутренней поверхности патрубка [3,4]. Блок АЭС работал на мощности электрической  $N_э = 983$  МВт и тепловой  $N_т = 2964$  МВт. Режим начался с разгрузки турбогенератора до  $N_э = 0$ , при этом в начальный период давления первого и второго контуров несколько возрастают, но затем работой быстродействующей редуциционной установки сброса пара температура

«горячих» ниток снижается до температуры «холодных» ниток, состояние блока на момент окончания режима было следующее  $N_э = 0$ ,  $N_т = 2200$  МВт. В конце планового режима неожиданно произошло аварийное отключение турбопитательных насосов по снижению уровней из-за уменьшения давления в деаэраторах. Это привело к отключению насосов по снижению уровней в парогенераторах, а затем сработала аварийная защита (АЗ) по сигналу отключения насосов и резко стал снижаться уровень теплоносителя в компенсаторе давления. В связи с дальнейшим снижением уровней в парогенераторе включились насосы аварийной питательной воды с реальной подачей холодной в горячие парогенераторы. После подъема уровня до 160 см были отключены аварийные насосы (эти насосы проработали около 11 мин) и включены в работу вспомогательные питательные электронасосы. Наибольшее воздействие испытал в этом режиме патрубок аварийной питательной воды парогенератора. Изменение напряжений и температур на наружной поверхности патрубка аварийной питательной воды парогенератора ПГ-4 в его утоненной части составило около 300 °С/мин при общем снижении температуры наружной поверхности на 240 °. При этом, напряжения на наружной поверхности патрубка резко снизились до -150 ч -190 МПа в течение 30 с. Результаты восстановления распределения температуры на внутренней поверхности патрубка аварийной питательной воды генератора на основе решения обратной задачи термоупругости представлены на плакате в докладе сплошной кривой  $T_{вн}$ . Следует отметить, что исходными данными для решения этой задачи служила информация о распределении на наружной поверхности температуры  $T_{нар}^{экс}$  и кольцевых напряжений  $\sigma_{нар}^{нар}$ , которые получены из  $\sigma_{нар}^{нар}$  путем вычитания величин кольцевых напряжений, возникающих от внутреннего давления в узле впрыска. Здесь же представлено распределение кольцевых напряжений  $\sigma_{нар}^{вн}$  на внутренней поверхности, полученное на основе решения обратной задачи термоупругости. Кроме того, было определено, что на наружной поверхности узла впрыска температура уменьшилась на 130 °С в течение 60 сек. Скорость изменения температуры составила 2,1 °С/сек. При этом напряжения на наружной поверхности изменились с +20 МПа до -160 МПа. Размах напряжений на наружной поверхности составил 180 МПа в течение 25 сек. Скорость изменения напряжений получилась равной 6,6 МПа/сек. При этом внутренняя поверхность узла впрыска в этом режиме испытывает большую термонапряженность, чем наружная поверхность.

**Выводы**

В связи с тем, большой интерес представляло сравнение результатов расчета программного комплекса «Inverse» и разработанной в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» методики обработки результатов контроля температур и давления в элементах оборудования реакторных установок, использующей другой математический аппарат — принцип разложения неизвестной температуры в ряд по системе ортогональных функций, заданных на отрезке времени измерения. Полученное различие решений обратной задачи, имеющее величину 18% (0,5 °С),

может объясняться неопределенностью в выборе теплофизических и физико-механических свойств материалов.

**Литература**

1. Шарый Н.В. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. - М.: ИздАТ, 2004, — 496 с.
2. Тихонов А.Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении [Текст] / А.Н.Тихонов, В.Д.Кальнер, В.Б.Гласко.— М.: Машиностроение, 1990.— 263 с.

Поступила в редакцию 03.07.2014

**В.О. Повгородній. Система діагностики енергетичного обладнання**

*Метою створення алгоритмів та систем контролю термонапруженого стану обладнання РУ є створення організації обробки експериментальної та експериментально-розрахункової інформації про процеси реального навантаження елементів та вузлів конструкції при її експлуатації для контролю та розрахунку накопичених у металі пошкоджень. Використання одержаної експериментальної інформації в деяких випадках має непрямий характер та це необхідно для перевірки та верифікації алгоритмів, що використовуються, побудовані ці алгоритми на основі методів вирішення обернених задач термопружності та теплопровідності, вибору конкретних розрахункових методик та параметрів регуляризації одержаних рішень.*

**Ключові слова:** температура, обернена задача, термопружність, критерій, матеріал.

**V.O. Povgorodny. System of diagnostics of the power equipment**

*The purpose of creation of algorithms and monitoring systems of a thermotension of the equipment of RU is the organization of processing of experimental and experimental and settlement information on processes of real loading of elements and design knots at its operation for control and the accounting of the damages saved up in metal. Use of received experimental information has in some cases indirect character and it is necessary for check and verification of the applied algorithms constructed on the basis of methods of the solution of the return problems of thermoelasticity and heat conductivity, a choice of concrete settlement techniques and parameters of regularization of received decisions.*

**Key words:** temperature, inverse problem, thermoelasticity, criteriy, material.