

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРИИ

С. В. Маслов^а

^а ФГБУН Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук (ИМАШ РАН), 101990, Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва, РФ,

maslovsv@inbox.ru

Цель работы - разработка метода контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) внутренних поверхностей оборудования, подверженных воздействию давления и тепловых потоков. Объекты контроля - корпуса паровых турбин, стопорных и регулирующих клапанов, паропроводы.

Действующие факторы механического и температурного нагружения:

- давление пароводяного теплоносителя;
- тепловые потоки со скоростью изменения температуры до 5°C/с.

В связи с тем, что полученные при натурных исследованиях параметры НДС используются в дальнейшем для анализа статической, квазистатической и циклической прочности конструкции [1], в результате обработки результатов тензометрических измерений необходимо получить функции изменения всех 3-х компонент тензора напряжений [2].

При известных главных направлениях непосредственно измерениями определяются 2 компоненты деформаций, что недостаточно для оценки по критерию Мизеса-Хенки.

Контролируя функции изменения давления во внутреннем объеме натурной конструкции, можно построить полные тензоры напряжений и деформаций в каждой расчетной точке, для этого предложен следующий алгоритм.

Из соотношений между **измеренными** (*) деформациями ϵ^* и главными напряжениями σ :

$$E \epsilon_i^* = \sigma_i - \mu(\sigma_j + \sigma_k),$$

где i, j, k - индексы главных осей, и учитывая,

что $\sigma_k = -P$, после преобразований получаем формулы зависимости искомых главных напряжений и главных деформаций от непосредственно измеряемых величин:

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_i^* + \mu \epsilon_j^*) - \frac{\mu}{1-\mu} P$$

$$\epsilon_k = -\frac{P}{E} \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) - \frac{\mu}{1-\mu} (\epsilon_i^* + \epsilon_j^*)$$

Таким образом, непосредственный контроль функций изменения 2-х компонент деформаций и давления во внутреннем объеме натурной конструкции позволяет построить историю изменения всех компонент тензоров напряжений и деформаций.

Механические характеристики E и μ (модуль упругости и коэффициент Пуассона) при использовании полученных соотношений должны задаваться в виде функций зависимостей от температуры. Поэтому температура внутренней поверхности конструкции также должна определяться в виде функции времени либо как результат прямых измерений, либо из решения прямых или обратных задач теплопроводности или термоупругости.

Для задач оценки прочности внутренних поверхностей паротурбинного оборудования существенное значение имеет определение НДС при быстрых изменениях температуры. Для таких процессов решения обратной задачи теплопроводности во многих случаях является крайне неустойчивым из-за проявления эффектов теплового демпфирования и запаздывания. Поэтому всё большее внимание уделяется разработке алгоритмов, основанных на решениях обратных задач термоупругости.

В **ИМАШ РАН** методы контроля НДС малодоступных зон натурных конструкций (внутренних поверхностей оборудования) развиваются в 2-х направлениях [3]:

- в направлении совершенствования средств прямого экспериментального контроля НДС внутренних поверхностей;
- В направлении развития расчетно-экспериментальных методов и алгоритмов, основанных на результатах косвенных измерений и их обработке с построением математических моделей процессов нагружения конструкции.

Разработка малоинерционных средства измерений деформаций и температур внутренних поверхностей пароводяного контура

Герметичные тензорезисторы для применения при давлении пароводяной среды до 20 Мпа и температурах до 540 °С

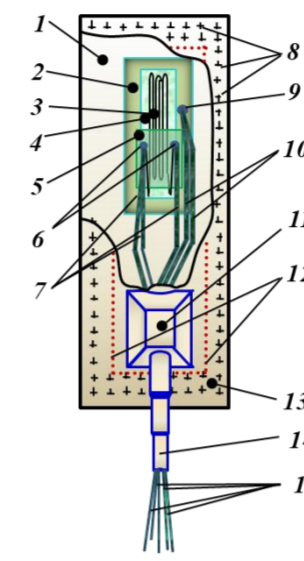
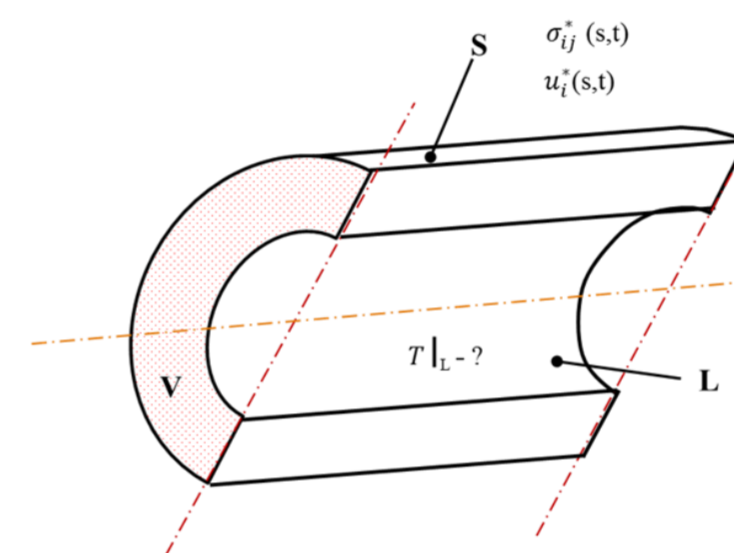


Схема конструкции герметичного тензорезистора (гермотензодатчика), предназначенного для измерения деформаций и температур на внутренних поверхностях пароводяного контура.

- 1 – подложка тензорезистора;
- 2 – изоляционный подслои;
- 3 – чувствительный элемент;
- 4 – органосиликатное связующее;
- 5 – изолирующая прокладка (стеклоткань);
- 6 – узлы приварки выводов к проводам;
- 7 – термостойкие коммуникационные провода;
- 8 – точки приварки к поверхности конструкции;
- 9 – спай термопары;
- 10 – компенсационные провода термопары;
- 11 – узел герметизации верхней крышки;
- 12 – швы герметизации верхней крышки;
- 13 – верхняя крышка (фольга 0,08 – 0,10мм);
- 14 – защитная трубка;
- 15 – термостойкие коммуникационные провода

Разработка алгоритмов, основанных на результатах косвенных измерений и их обработке на основе построенных математических моделей

Обратная задача термоупругости для цилиндрической конструкции

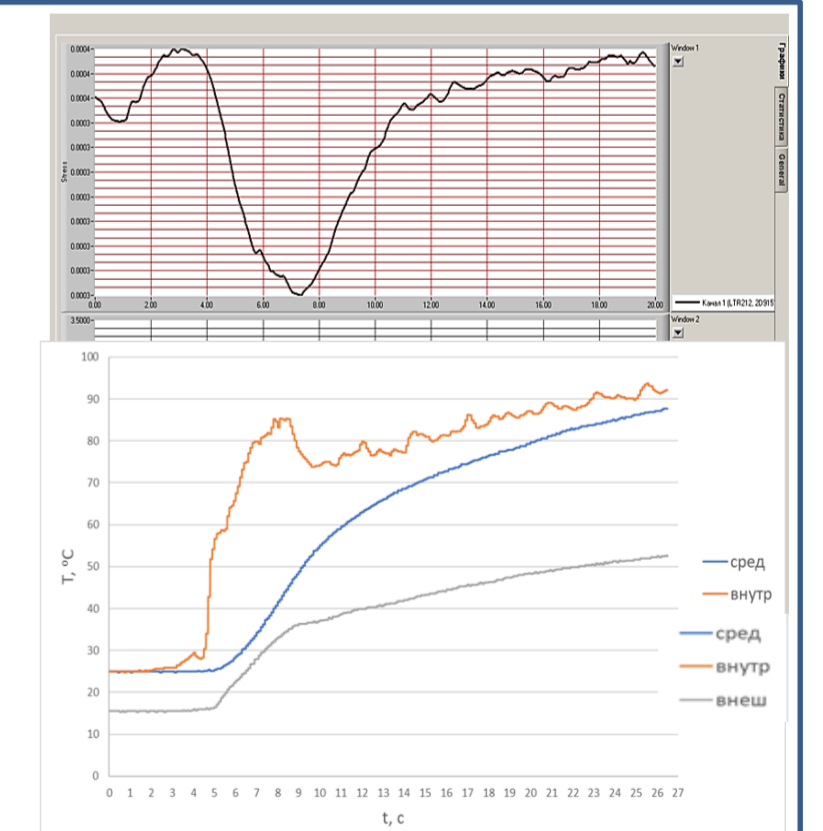
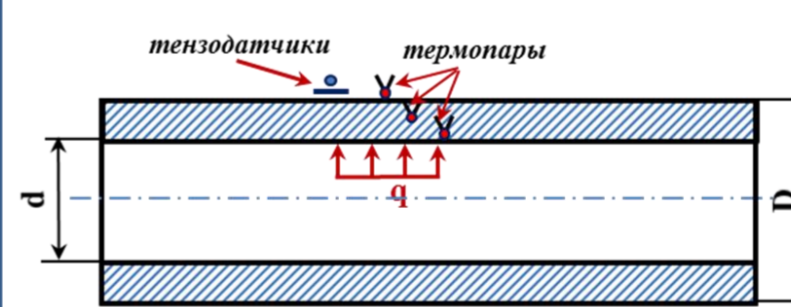


Поверхность S – доступна для установки измерительных преобразователей
Поверхность L – внутренняя, подвергается интенсивному воздействию теплоносителя с переменной температурой

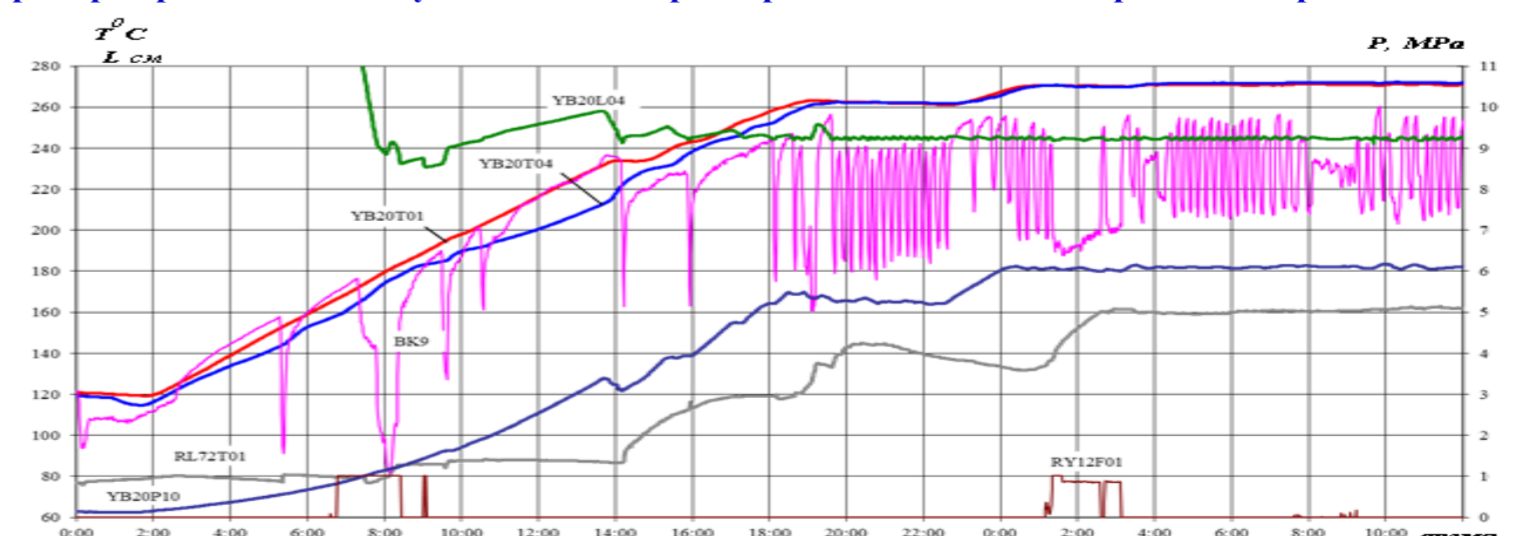
Разрешающие уравнения:

Уравнения теории упругости:	$\mu \nabla^2 u_i + (\lambda + \mu) u_{jji} = \frac{\alpha_t E}{1 - 2\nu} T_{jji}$
Уравнения теории теплопроводности:	$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \nabla^2 T$

Экспериментальное изучение реакции датчиков температуры (термопар) и деформации (тензорезисторов) на тепловой «удар» со стороны внутренней поверхности трубы. На диаграмме показания термопар и тензорезисторов синхронизованы по времени.



Пример определения эксплуатационных параметров с использованием решений обратных задач



ЛИТЕРАТУРА

- Алексеева М. С., Алимов М. А., Архипов В. Е. и др., 2023. Исследования и обоснование прочности и безопасности машин. Под редакцией Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. Москва, издательство МГОФ «Знание», 2023 - 832 с. EDN: GKLXLB.
- Razumovskii I.A., Chernyatin A.S., Fomin A.V. Experimental-Computational Methods for Determination the Stress-Strain State of Structural Components / Inorganic Materials. 2014. V. 50. № 15. P. 1528-1536. DOI: 10.1134/S0020168514150151.
- Маслов С.В. Применение натурной тензометрии для исследования напряженного состояния нового энергетического оборудования / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Том 88, № 1. С. 64-74. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-12-64-74.