

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-12-64-74>

ПРИМЕНЕНИЕ НАТУРНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© Сергей Валерьевич Маслов

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4; e-mail: maslovsv@inbox.ru

*Статья поступила 31 марта 2022 г. Поступила после доработки 27 июня 2022 г.
Принята к публикации 29 июля 2022 г.*

В связи с созданием нового поколения энергетического оборудования (атомных реакторов, газотурбинных установок, специальных энергоустановок), имеющего повышенные эксплуатационные параметры и отвечающего высоким требованиям безопасности, возникает задача создания новых отечественных методов определения напряжений и деформаций, возникающих в наиболее ответственных элементах при эксплуатации подобных установок. Предложены новые подходы к решению поставленной задачи, включающие восстановление и развитие отечественных компетенций в создании средств экспериментального контроля деформаций в элементах оборудования при высоких температурах. Приведены результаты разработки косвенных методов определения деформаций в опасных точках конструкции на основе решений обратных задач экспериментальной механики. Рассмотрены усовершенствованные алгоритмы обработки экспериментальной информации и определения напряжений по измеренным деформациям в случае неупругого поведения материала конструкции в зонах тензометрических измерений. В качестве средств экспериментального определения деформаций, возникающих на внутренних поверхностях контура циркуляции жидкометаллического теплоносителя новых атомных реакторов типа БН и БРЕСТ, предлагаются усовершенствованные герметичные тензорезисторы, обладающие стойкостью к воздействию свинцового и натриевого теплоносителя. Приведены результаты стендовых испытаний разработанных средств измерений в среде жидкого натрия с температурой $T = 540^\circ\text{C}$. В связи с повышением требований к оценке влияния ползучести тензорезисторов на результаты измерений при высокой температуре разработана конструкция стенда, позволяющего установить границы возможной погрешности при T до 600°C при динамическом нагружении конструкции. Предложена методика проведения эксперимента по определению границ возможной погрешности, связанной с ползучестью тензорезисторов. Для нахождения напряжений, возникающих в опасных точках теплообменного оборудования реакторов типа БН, расположенных в недоступных зонах внутренней поверхности установки, предложен итерационный алгоритм решения обратной задачи термоупругости, использующий измеренные значения напряжений и температур на наружной поверхности конструкции. Проведенные исследования позволили усовершенствовать традиционную методику натуральных тензометрических исследований.

Ключевые слова: энергетическое оборудование; напряженное состояние; экспериментальный контроль; натурная тензометрия; жидкометаллический теплоноситель; косвенные измерения; обратная задача.

THE USE OF FULL-SCALE TENSOMETRY FOR STUDYING THE STRESS STATE OF NEW POWER EQUIPMENT

© Sergey V. Maslov

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Science, 4, Maly Kharitonyevsky per., Moscow, 101990, Russia; e-mail: maslovsv@inbox.ru

Received March 31, 2022. Revised June 27, 2022. Accepted July 29, 2022.

Creation of the new generation of power equipment (nuclear reactors, gas turbine plants, special power plants) with increased operational parameters and meeting high safety requirements, entails the goal of creating novel domestic methods for determining stresses and strains that occur in the most critical elements during operation of such installations. The new approaches, including the restoration and development of domestic competencies in the creation of means for experimental control of deformations in elements of the equipment at high temperatures are proposed. The results of developing indirect methods

providing determination of the deformations at the most critical points of the structure based on solutions of the inverse problems of experimental mechanics are presented. Improved algorithms for processing experimental information and determining strains from measured stresses are considered for the case of inelastic behavior of the structural material in the zones of tensometric measurements. The improved hermetic strain gauges resistant to lead and sodium coolant are proposed for experimental determination of the deformations that occur on the internal surfaces of the liquid metal coolant circulation circuit of new nuclear reactors of BN and BREST types. The results of tests of the developed measuring instruments in liquid sodium medium at a temperature of 540°C during bench tests are presented. In conditions of increased requirements for assessing the effect of the strain gauge creep on the measurement results obtained at high temperatures, a stand design has been developed that makes it possible to determine the boundaries of a possible error at temperatures up to 600°C under dynamic loading of the structure. To determine the stresses arising at dangerous points of the heat exchange equipment of BN type reactors located in inaccessible areas of the inner surface of the facility, an iterative algorithm for solving the inverse problem of thermoelasticity is proposed, using the measured values of stresses and temperatures on the outer surface of the structure. A set of improvements to the traditional method of full-scale tensometric study is proposed proceeding from the analysis and implementation of the data obtained.

Keywords: energy equipment; stress state; experimental control; full-scale tensometry; liquid-metal coolant; indirect measurements; inverse problem.

Введение

В отечественном энергомашиностроении продолжается процесс проектирования и сооружения энергетических установок нового поколения — атомных электростанций (АЭС) типа ВВЭР повышенной мощности [1], АЭС и опытных установок с реакторами на быстрых нейтронах (БН) [2], парогазотурбинных установок [3], аэрокосмических и специальных транспортных установок с повышенными рабочими параметрами. В связи с необходимостью обеспечения надежной и безопасной эксплуатации подобных технических систем [4] возникает задача создания усовершенствованных методов и средств экспериментального контроля, обеспечивающих получение информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) наиболее нагруженных элементов таких установок в условиях их испытаний и эксплуатации. Цель разработок — уменьшение риска разрушения технических систем, обеспечение мониторинга НДС в опасных точках для восстановления истории нагружения и оценки остаточного ресурса конструкции. Подобные подходы успешно применяют для контроля безопасности эксплуатации авиационных конструкций [5] и используют для мониторинга состояния создаваемых термоядерных [6] установок. Особенно актуально решение задачи контроля НДС для создаваемых ядерных энергоустановок, режимы эксплуатации которых могут значительно отличаться от расчетных из-за сложной геометрии конструкций и не всегда предсказуемых изменений температурного состояния при сложных и многовариантных процессах термомеханического нагружения. К подобным установкам нового поколения, требующим применения средств экспериментального контроля с повышенными техническими характеристиками, относятся, в частности, реакторы на быстрых нейтронах и опытные реакторы БРЕСТ, в которых

используют жидкометаллические теплоносители с температурой выше 500 °С и сложным характером ее изменения во времени. К сожалению, компетенции отечественных научных, конструкторских и исследовательских центров в области разработки методов и средств экспериментального контроля [7 – 11], применимых в условиях длительных натурных и стендовых испытаний при температурах выше 450 °С и воздействии агрессивного теплоносителя переменной температуры, в настоящее время в значительной степени утрачены и требуют восстановления и дальнейшего развития. Повышается также актуальность создания отечественных методик, средств измерений и методов их аттестации, используемых при температурах порядка 600 – 700 °С в условиях воздействия динамических нагрузок, характерных для узлов и деталей авиационных и аэрокосмических систем. В данной статье рассмотрены вопросы разработки средств и алгоритмов расчетно-экспериментального исследования НДС, применимых в условиях квазистатического нагружения элементов указанных конструкций со стороны теплоносителей и сред переменной температуры. Анализ условий нагружения создаваемых энергоустановок позволил предложить расчетно-экспериментальную методику определения НДС по результатам косвенных тензометрических и термометрических измерений с применением алгоритмов решения прямой и обратной задач термоупругости.

Разработка средств прямого экспериментального контроля НДС внутренних поверхностей оборудования БН (экспериментальная часть)

Для определения НДС внутренних поверхностей действующего оборудования АЭС необходимо применение герметичных тензорезисторов, стойких к воздействию теплоносителя и сохра-

няющих работоспособность в течение всего периода пусконаладочных испытаний. В частности, для измерения деформаций в элементах реакторов на быстрых нейтронах при температурах 520 – 540 °С необходимо использовать тензорезисторы, имеющие в этих условиях стабильные или определяемые по надежным алгоритмам метрологические характеристики. До настоящего времени в отечественной практике для измерений деформаций при повышенных температурах применяли разработанные в ИМАШ РАН никельмолибденовые тензорезисторы типов НМП-430 и НМТ-450. Единственный изготовитель ограниченных партий подобных тензорезисторов — ОКБ «Гидропресс», где их применяют при собственных пусконаладочных испытаниях оборудования реакторов ВВЭР. К сожалению, других отечественных производителей подобных средств измерений в настоящее время не сохранилось; к тому же технические характеристики (в частности, максимальная рабочая температура) тензорезисторов типа НМТ не допускают их прямого использования для исследований НДС оборудования нового поколения. Зарубежные производители высокотемпературных тензорезисторов, например, японская фирма KYOWA, имеют в ассортименте так называемые «капсулированные» тензорезисторы¹, устойчивые к воздействию агрессивной среды. К сожалению, эти тензорезисторы не имеют встроенного температурного датчика, а поэтому исключают возможность использования приведенной ниже методики оценки точности измерений по изменению температурной характеристики. Кроме того, отсутствие данных по температуре не позволяет учитывать изменение механических свойств материалов и возможное возникновение пластических зон в точке установки тензорезистора.

Для расширения температурного диапазона применения никельмолибденовых тензорезисторов в ИМАШ РАН предложено использовать специальную методику их предварительной термообработки, включающую длительные изотермические выдержки при высокой температуре. Кроме того, рекомендовано использовать полумосты тензорезисторов, подобранные в пары (активный + компенсационный) по нескольким параметрам, в том числе по параметрам дрейфа начального сопротивления и дрейфа температурной характеристики. Проведенные исследования и предложенные конструкторские решения позволили разработать герметичные тензометрические датчики (гермотензодатчики) на металлической подложке, имеющие, кроме тензорезисторов, встроенную термопару для контроля их тем-

пературного состояния. Отличительной особенностью этих тензодатчиков является низкая тепловая инерция, обеспечиваемая малым термическим сопротивлением автономной защиты — фольги из аустенитной нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Для соединения гермотензодатчика с защитной коммуникационной линией разработан переходной узел (переходник), к которому прикрепляется фольга тензорезистора. Герметичность соединения переходника с защитной фольгой обеспечивается одним из трех вариантов технологии изготовления: 1) пайкой серебряным припоем ПСр72 по ГОСТ 19738–2015; 2) точечной контактной приваркой с наложением сварных точек; 3) пайкой никелевыми припоями ВПр-4 и ВПр-7 разработки ВИАМ. Работоспособность гермотензодатчиков, изготовленных с применением указанных технологий герметизации, проверяли на стенде внутри циркуляционного контура с жидкометаллическим натриевым теплоносителем при действии термоциклических нагрузок — медленных нагревах до 540 °С с последующими быстрыми охлаждениями до 250 °С. Скорость нагрева составляла около 20 град/ч; скорость охлаждения — от 5 до 10 град/с. В таблице приведены результаты стендовых испытаний средств измерений в среде жидкого натрия длительностью 500 ч.

Установлено, что наилучший вариант технологии герметизации — пайка припоем ВПр-7 (в вакууме или среде защитного газа). Контактная приварка с наложением сварочных пятен является приемлемым вариантом при небольшой длительности воздействия теплоносителя и малом числе термических циклов. Проведенный анализ позволил предположить, что потеря герметичности в зоне контактной сварки связана с циклической усталостью металла в этой зоне. Другие технологии пайки признаны неприемлемыми из-за быстрого разрушения паяного шва. На рис. 1 показан внешний вид поверхности защитной фольги гермотензодатчиков до и после испытаний. Фотографии фольги получены с помощью микроскопа StereoScan (увеличение 2000). Видно, что в процессе воздействия жидкометаллического теплоносителя на поверхности защитной фольги происходит возникновение и рост трещин, преимущественно в зоне имевшихся изначально микродефектов. Выполненный анализ позволил определить марки фольги, для которых этот эффект минимален. Тензорезисторы, аналогичные испытанным на стенде с натурным теплоносителем и изготовленные по оптимальной технологии (с пайкой припоем ВПр7 и фольгой из стали 0Х18Н9), применены при натурных исследованиях НДС теплообменника реактора БН.

¹ Каталог ф. KYOWA (Япония). KYOWA Sensor System Solution; <http://kyowa.ru>

Методы повышения верхней границы температурного диапазона применения тензорезисторов

Характерной особенностью новых и создаваемых энергоустановок является также повышение границы температурного диапазона, в котором происходит термомеханическое нагружение элементов конструкции. В связи с этим существующие отечественные средства тензометрии и методики их применения должны быть усовершенствованы и адаптированы к новым условиям проведения измерений. Применение натурной тензометрии в указанных новых условиях связано со следующими трудностями.

1. Требуется пересмотр методики использования разработанных ранее тензорезисторов типа НМТ с чувствительными элементами из никельмолибденовых, железохромалюминиевых сплавов НМ23ЭЮТ, 0Х14Ю6ФМ и аналогичных при температурах выше 500 °С из-за существенного возрастания неинформативных сигналов, вызванных дрейфом характеристик.

2. Необходима разработка усовершенствованной методики учета и ограничения ползучести тензорезисторов при произвольных функциях изменения измеряемых деформаций для верхней границы диапазона рабочих температур до 520 – 540 °С.

3. В связи со значительными изменениями механических свойств конструкционных материалов в широком диапазоне температур следует создать алгоритмы определения действующих напряжений в точках измерения деформаций, учитывающих возможность неупругого поведения материала, появления остаточного формоизменения и изменений механических характеристик, используемых в расчетных формулах.

С учетом указанных выше задач целесообразно дополнить соответствующим образом требования стандарта², определяющего методику

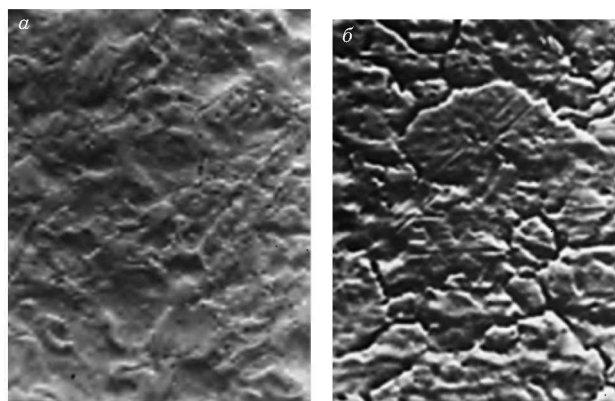


Рис. 1. Поверхность защитной фольги до (а) и после (б) испытаний; увеличение 2000

Fig. 1. The surface of the protective foil before testing (a) and after testing (b); magnification 2000

выполнения тензоизмерений на натуральных объектах, и стандарта, устанавливающего процедуры определения метрологических характеристик тензорезисторов³.

Развитие методики учета и минимизации параметров дрейфа тензорезисторов. В условиях длительных испытаний конструкции при высоких температурах дрейф тензорезисторов становится причиной возможного возрастания погрешностей измерений до недопустимых величин. К сожалению, введение в расчетные формулы для деформаций систематических поправок, учитывающих влияние дрейфа, невозможно. Это связано с неоднозначностью зависимостей параметров дрейфа от функции изменения температуры во времени. Поскольку исключить или замедлить физические процессы, происходящие в металле чувствительных элементов тензорезисторов при высоких температурах, невозможно, необходимо применять оптимальные измерительные схемы и использовать адекватные алгоритмы оценки возникающих погрешностей. Ана-

² ГОСТ Р 52728–2007. Метод натурной тензотермометрии. Общие требования. — М.: Изд-во стандартов, 2007. — 16 с.

³ ГОСТ 21616–91. Тензорезисторы. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1991. — 47 с.

Нарушение (–) или сохранение (% исправных образцов) герметичности тензометрических датчиков, изготовленных по разным технологиям герметизации

Violation (–) or preservation (% of serviceable samples) of the tightness of tensometric sensors manufactured according to various sealing technologies

Вариант герметизации переходника	Выдержка 50 ч, температура 250 °С	Герметичность после 50 термических циклов	Герметичность после 100 термических циклов	Герметичность после 500 термических циклов
Пайка, припой ПСр-72	0 %	–	–	–
Пайка, припой ВПр-4 (ВИАМ)	80 %	33 %	–	–
Пайка, припой ВПр-7 (ВИАМ)	100 %	100 %	100 %	92 %
Точечная приварка	100 %	100 %	84 %	42 %

лиз, проведенный автором, показал, что некомпенсированный дрейф тензорезисторов в диапазоне температур 450–540 °С может уже через 2–3 ч привести к погрешности измерения деформации до 0,05 %, что в большинстве случаев является неприемлемым. Поэтому единственное эффективное средство минимизации дрейфа выходного сигнала — применение алгоритмов определения деформаций по разности сигналов «активного» (воспринимающего деформацию) и «компенсационного» (подверженного только действию температуры) тензорезисторов. При этом возможны варианты как схемного решения задачи с включением активного и компенсационного преобразователей в разные плечи измерительного моста, так и применения алгоритма расчета деформаций по разности измеренных сигналов тензорезисторов. К сожалению, полностью исключить влияние дрейфа на результаты измерений нельзя из-за неизбежных случайных отличий параметров дрейфа отдельных тензорезисторов. Для минимизации этого эффекта существует разработанный в ИМАШ РАН метод подбора тензорезисторов в пары по параметрам дрейфа, при котором перед проведением исследований тензорезисторы подвергаются длительным тепловым испытаниям с измерением функций изменения их выходных сигналов [12]. Подобная процедура невозможна для капсулированных тензорезисторов, в которых внутри капсулы находятся сформированные в процессе изготовления измерительные полумосты.

Разность параметров дрейфа для пары тензорезисторов является случайной величиной, которую можно определить экспериментально для конкретных условий изменения температуры в процессе тензоизмерений. Для этого целесообразно использовать выборку (12–16 штук) цилиндрических образцов, изготовленных из материала натурной конструкции, на которых установлены пары тензорезисторов, называемых «свидетелями», по той же технологии, которую используют для измерений деформаций в конструкции. Образцы-«свидетели» устанавливают в зоне с температурой, максимальной по отношению к другим измерительным точкам, при этом используют технологию, исключающую их деформирование в процессе испытаний. Измерительную схему, технологии монтажа и защиты коммуникационных линий для «свидетелей» применяют такие же, как для всех преобразователей тензоизмерительной системы. В этом случае статистическая обработка сигналов «свидетелей» позволяет оценить максимальную для исследуемой конструкции величину случайной составляющей погрешности измерений (за исклю-

чением составляющей, связанной с ползучестью тензорезисторов). В то же время для современных энергоустановок характерен широкий диапазон температур, при которых эксплуатируются элементы конструкции. Поэтому предложенный выше метод определения случайной погрешности с применением «свидетелей» для зон с более низкими температурами дает ее завышенную оценку. Для этого случая предлагается следующий косвенный метод оценки параметров дрейфа, основанный на измерении сигналов компенсационных тензорезисторов, используемых в системе тензометрии. Выходной сигнал тензорезисторов, связанный с дрейфом, представляется в виде суммы двух составляющих: $\xi_t = \xi_c + \Delta\xi_t$, где ξ_t , ξ_c и $\Delta\xi_t$ — соответственно дрейф действительного сопротивления, дрейф начального сопротивления и изменение температурной характеристики за время t , в течение которого тензорезистор подвергался воздействию переменной повышенной температуры. Первая составляющая, связанная с дрейфом начального сопротивления, для полумоста тензорезисторов приравнивается к нулю при использовании для них новых балансов при начале исследуемого режима нагружения, а поэтому не накапливается в течение натурального эксперимента. Изменение температурной характеристики сопротивления (ТХС) происходит в течение всего периода испытаний и приводит к постоянному возрастанию погрешности измерений. Выполненные в ИМАШ РАН эксперименты позволили установить важную закономерность — линейную зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) приращения исходных температурных характеристик тензорезисторов $S(\Delta\xi_t)$ от среднего значения $\Delta\xi_t$. На рис. 2 приведены указанные зависимости, полученные для никельмолибденовых тензорезисторов, подвергнутых изотермическим выдержкам при температурах 520 и 540 °С, а также входящих в этот диапазон.

Результаты экспериментов, некоторые из которых показаны на рис. 2, позволили определить коэффициент пропорциональности между средней величиной возрастания температурной характеристики и значением ее СКО. Оказалось, что этот коэффициент не зависит от функции изменения температуры тензорезисторов во времени и составляет $K^* = 2,5 \cdot 10^{-2}$. Поэтому для оценки составляющей погрешности, связанной с дрейфом ТХС, можно использовать измеренные в процессе натурального эксперимента величины возрастания температурных характеристик компенсационных тензорезисторов. Для этого в программном комплексе управления процессом измерений необходимо предусмотреть режим опро-

са компенсационных тензорезисторов перед началом каждого этапа испытаний. В связи с вызванным дрейфом разбросом значений ТХС компенсационных тензорезисторов $(\Delta\xi_t)_k$ эти величины отличаются от генерального среднего для партии. Анализ показывает, что при принятой доверительной вероятности $\alpha = 0,997$ величина СКО разностей температурных характеристик пары тензорезисторов «активный — компенсационный» определяется формулой

$$S(\Delta\xi_t) = \frac{\sqrt{2}K^*}{1 - 3K^*} (\Delta\xi_t)_k. \quad (1)$$

Эту формулу можно использовать для оценки случайной составляющей погрешности, связанной с дрейфом температурных характеристик тензорезисторов, независимо для каждой измерительной точки. Серия проведенных в ИМАШ РАН экспериментов подтвердила возможность использования формулы (1) и данных, приведенных на рис. 2, в диапазоне температур от 350 до 540 °C.

Методика определения границ возможной ползучести тензорезисторов при произвольных функциях изменения деформаций. Ползучесть тензорезисторов является характеристикой, явно зависящей от функции изменения деформации во времени и неявно — от функции изменения температуры, влияющей на скорость изменения сигнала тензорезистора, связанного с этой величиной. Физически ползучесть тензорезисторов вызвана несовершенством их связующего и проявляется в постепенном уменьшении полезного сигнала при постоянной деформации на базе тензорезистора. Неинформативную составляющую выходного сигнала $\xi_{\text{п}}$, связанную с ползучестью, принято аппроксимировать [13, с. 31] для случая скачкообразного возрастания деформации экспоненциальной функцией вида

$$\xi_{\text{п}} = A_t(\varepsilon)[1 - e^{-t/\alpha_t(\varepsilon)}], \quad (2)$$

где $A_t(\varepsilon)$ — предел ползучести; t — время; ε — деформация; $\alpha_t(\varepsilon)$ — постоянная времени. К сожалению, практически использовать эту формулу для определения $\xi_{\text{п}}$ при натурных исследованиях НДС не представляется возможным, так как параметры A_t и α_t зависят от произвольно меняющейся температуры t ; кроме того, деформация является сложной и нередко знакопеременной функцией времени. Определять величину ползучести для множества точек натурной конструкции с помощью специальных экспериментов не имеет смысла, так как объем таких экспериментов сопоставим с объемом самих натурных исследований. Поэтому внесение в результаты измере-

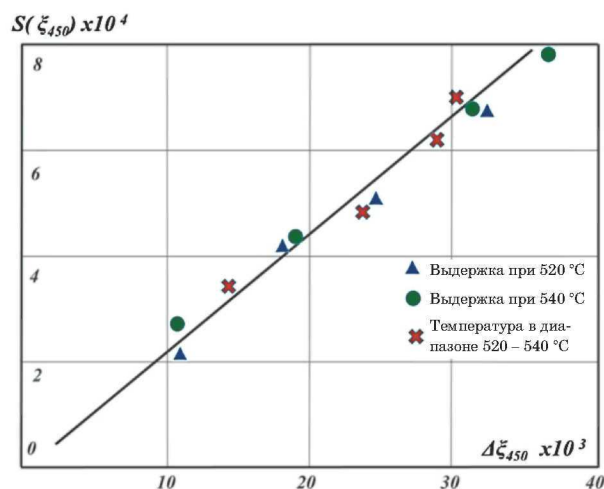


Рис. 2. Зависимость СКО разностей температурных характеристик подобранных в пары тензорезисторов от величины возрастания средней температурной характеристики партии

Fig. 2. The dependence of the cattle differences of the temperature characteristics of strain gauges combined in pairs on the value of increase in the average temperature characteristics of the batch

ний систематической поправки на величину ползучести обычно признается недопустимым, и максимально возможная для условий эксперимента $\xi_{\text{п}}$ учитывается как аддитивная составляющая погрешности измерений. К сожалению, для условий испытаний нового поколения энергоустановок эта составляющая может оказаться неприемлемо большой из-за возрастания скорости ползучести тензорезисторов при высокой температуре. К сожалению, определение параметров ползучести на балках, нагруженных постоянной нагрузкой, при температуре выше 450 °C весьма затруднительно из-за ползучести самого материала балки. Поэтому предлагается метод, заключающийся в определении границ возможной величины $\xi_{\text{п}}$ для тензорезисторов, установленных на консольной балке, нагреваемой протекающим электрическим током и нагружаемой переменной нагрузкой с синусоидальным законом изменения во времени. Анализ изменения выходного сигнала тензорезистора показал, что измеряемая деформация в результате эффекта ползучести, определяемого формулой (1), также имеет синусоидальный характер, но с амплитудой, меньшей на величину $\Delta\xi_{\text{п}}$, чем действительная амплитуда изменения деформации, как это показано на рис. 3. Приведенные здесь функции получены экспериментально для никельмолибденовых тензорезисторов с органическим связующим при постоянной температуре испытаний 680 °C и амплитуде деформации 1000 мкм.

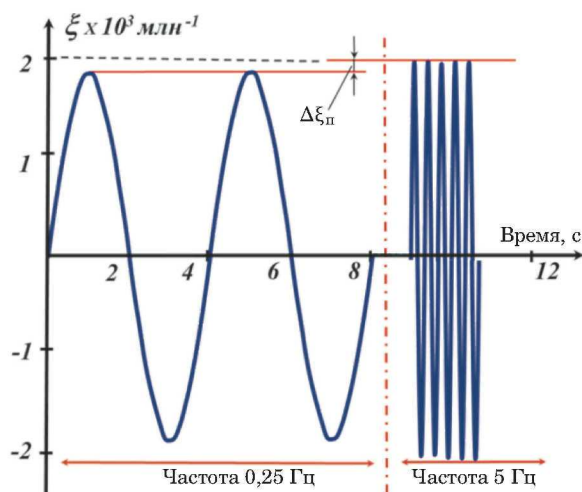


Рис. 3. Влияние ползучести тензорезисторов на амплитуду сигнала для синусоидальной нагрузки

Fig. 3. The effect of strain gauge creep on the signal amplitude for the sinusoidal load

Для исследований ползучести тензорезисторов в диапазоне температур от 25 до 700 °С при переменных нагрузках синусоидального характера в ИМАШ РАН сконструирован испытательный стенд, кинематическая схема и внешний вид которого показаны на рис. 4. Температурой нагрева образца управляют вручную; частоту оборотов регулируют электронной схемой управления.

Анализируя экспериментальные результаты, аналогичные показанным на рис. 3, но полученные для набора различных частот нагружения, можно построить зависимость $\Delta\xi_{\text{п}}$ от частоты нагружения; полученное значение $\Delta\xi_{\text{п}}$ при нулевой частоте будет соответствовать величине A_{t} в формуле (2). Существенным ограничением использования подобного подхода является то, что

он позволяет оценить предел ползучести для уровня деформации, при котором получены экспериментальные данные, в то время как при натурных испытаниях деформации непрерывно меняются. Кроме того, использование A_{t} в качестве возможной величины погрешности дает завышенную оценку при небольшой длительности режима испытаний. Поэтому для альтернативной оценки возможной погрешности, вызванной ползучестью тензорезисторов при натурных исследованиях, предлагается методика, в которой используются указанные выше результаты испытаний для различных температур, частот и амплитуд синусоидальной нагрузки. На участке времени, соответствующем конкретному режиму испытаний, для измеренной функции изменения деформации строят «огibaющие» функции в виде полуволны синусоиды, как это показано на рис. 5.

Варианты построения огibaющих функций выбирают с учетом характера измеренной функции изменения деформаций. Для случая, показанного на рис. 5, огibaющие функции строят по следующим уравнениям: $A_1 \sin \omega_1 t_1 = \xi_1$; $A_1 \sin \omega_1 t_3 = 0$ — для варианта 1; $A_2 \sin \omega_2 t_0 = 0$; $A_2 \sin \omega_2 t_1 = \xi_1$; $A_2 \sin \omega_2 t_4 = 0$ — для варианта 2.

Для определения возможной погрешности, вызванной ползучестью тензорезисторов, целесообразно выбрать вариант, для которого эта величина минимальна.

Таким образом, возможное влияние ползучести тензорезисторов на результаты исследований целесообразно учитывать, принимая во внимание оценки:

по данным циклических испытаний по указанной выше методике;

по пределу ползучести при максимальной температуре испытаний;

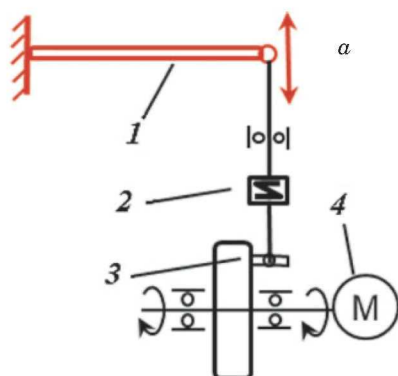


Рис. 4. Установка для исследований ползучести тензорезисторов при переменных синусоидальных нагрузках: а — кинематическая схема устройства нагружения (1 — образец; 2 — муфта; 3 — кривошип; 4 — двигатель); б — общий вид и компоновка органов управления и регистрации

Fig. 4. Installation for studying the strain gauge creep under variable sinusoidal loads: а — kinematic scheme of the loading device (1 — sample; 2 — clutch; 3 — crank; 4 — engine); б — general view and layout of the control and registration units

по часовой ползучести при максимальной температуре (имеющейся в паспорте на партию тензорезисторов) — для длительности режима испытаний менее одного часа. Поскольку все указанные варианты содержат запасы, из полученных оценок погрешности целесообразно выбрать минимальную по величине.

Особенности алгоритма определения напряжений по результатам измерений деформаций. Алгоритм обработки результатов тензоизмерений, реализуемый в информационно-измерительных системах реакторов БН и энергоустановок, эксплуатируемых при температуре выше 450 °С, имеет особенности, связанные с существенным изменением механических свойств конструкционных материалов и возможным возникновением пластических зон в местах установки тензорезисторов. Для определения напряжений необходимо учитывать:

функциональную зависимость модуля упругости от температуры;

изменение функциональных зависимостей между напряжениями и деформациями в упруго-пластической области;

возможное изменение условий перехода материала в упругопластическое состояние вследствие влияния предшествующих нагружений конструкции.

Значение модуля упругости $E^{(t)}$ при упругом поведении материала является мультипликативной составляющей формул расчета напряжений $\sigma_{l,m}$ по измеренным деформациям [13, с. 180]

$$\sigma_{l,m} = \frac{E^{(t)}}{1 - \mu^2} (\epsilon_l + \mu \epsilon_m), \quad l, m = 1, 2. \quad (3)$$

Учет зависимости $E^{(t)}$ от температуры при обработке результатов измерений необходим в случае, когда его относительное изменение в рабочем диапазоне температур соизмеримо с допустимой погрешностью определения напряжений, априори следуемой из постановки задачи выполняемых исследований. К сожалению, функция изменения модуля упругости от температуры материала часто отсутствует в справочных материалах, поэтому в случае необходимости ее следует находить экспериментально.

Расширение диапазонов изменения механических и температурных нагрузок в создаваемых энергоустановках приводит к возрастанию вероятности возникновения упругопластических деформаций в наиболее нагруженных зонах конструкций. Как показал опыт проведенных натурных исследований, реальные функции изменения напряжений в опасных точках конструкции имеют сложный характер; в течение исследуемого режима испытаний деформированное состояние может переходить от упругого к упруго-

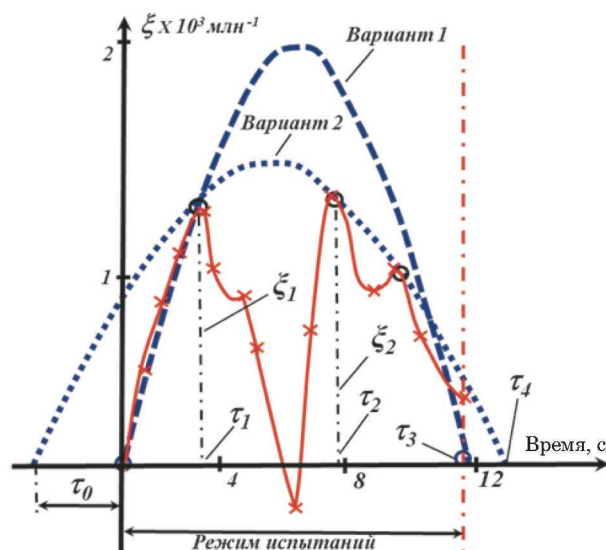


Рис. 5. Варианты определения возможной величины ползучести тензорезистора для режима испытаний

Fig. 5. Options for determining the value of possible strain gauge creep for the test mode

пластическому и обратно. Для определения НДС в упругопластической области необходимо использовать модель связи между напряжениями и деформациями, наиболее близкую к реальной. К сожалению, простые модели деформирования (например, модель с линейным упрочнением) в большинстве случаев неприменимы для конструкционных материалов, подверженных воздействию теплоносителей, например, аустенитных нержавеющих сталей. В этом случае предлагаем определять напряжения по измеренным деформациям в процессе тензометрических исследований по следующему алгоритму.

1. По имеющейся или полученной в результате дополнительных экспериментов диаграмме растяжения материала строим диаграмму деформирования, в результате получаем функцию связи между интенсивностями деформаций и напряжений для рабочей температуры.

2. В начале исследуемого режима испытаний натурной конструкции по измеренным значениям деформаций находим напряжения в измерительных точках по формулам (3), применимым для упругой области деформирования. Полученные величины напряжений используем для постоянного контроля условия перехода материала в упругопластическое состояние — достижения интенсивности напряжений предела текучести.

3. При возрастании интенсивности напряжений до величин, превышающих предел текучести, расчет главных осевых напряжений проводим по формулам деформационной тео-

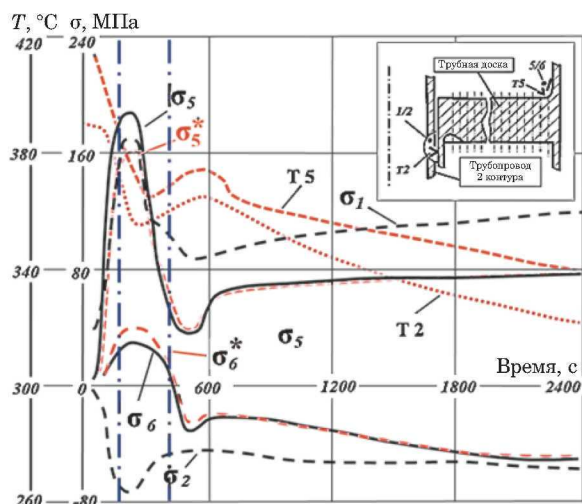


Рис. 6. Результаты обработки экспериментальных данных по напряженному состоянию теплообменника реактора БН при срабатывании аварийной защиты

Fig. 6. Results of processing experimental data on the stress state of the heat exchanger of a BN reactor upon triggered emergency protection

рии пластичности⁴ для двухосного напряженного состояния:

$$\sigma_k = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_k - \varepsilon_0) + K\varepsilon_0, \quad k = 1, 2, \quad (4)$$

где σ_k — искомые осевые напряжения; ε_k — измеренные значения деформаций; K — объемный модуль упругости материала; σ_i и ε_i — интенсивности напряжений и деформаций соответственно; ε_0 — средние напряжения. В процессе тензоизмерений значения интенсивностей напряжений постоянно контролируем для определения момента перехода деформированного состояния в упругую область.

4. После понижения интенсивности напряжений до предела текучести расчет главных напряжений выполняем по формулам (3).

В дальнейшем процесс повторяем до окончания текущего режима испытаний.

Приведенный алгоритм применен при обработке результатов натурных исследований НДС промежуточного теплообменника (ПТО) опытного реактора типа БН. На рис. 6 приведены графики изменений главных напряжений, возникающих на внутренней поверхности в зонах сопряжения элементов, обладающих разными теплофизическими характеристиками, а также геометрическая схема исследуемого фрагмента конструкции (в верхней правой части). Видно,

что функции изменения главных (вследствие осевой симметрии) напряжений немонотонны и в ряде случаев могут иметь разные знаки, что приводит к увеличению интенсивности напряжений по сравнению с осевыми напряжениями. В результате в зоне расположения измерительной точки 5/6 (см. рис. 6) происходят переходы от упругого состояния к упругопластическому и обратно (отмечены штрихпунктирными линиями). В пределах упругопластического участка деформирования (между штрихпунктирными линиями) функции изменения напряжений σ_1 и σ_2 , построенные измерительной системой с применением классических алгоритмов, перестроены и показаны на рис. 6 кривыми, имеющими в обозначениях напряжений с верхним индексом «*».

Расчетно-экспериментальное определение НДС по результатам тензоизмерений

Применение разрабатываемых средств экспериментального контроля НДС в наиболее опасных точках конструкции ограничено их недостаточной стойкостью к воздействию теплоносителя и трудностями вывода измерительных линий из внутреннего объема конструкции. Поэтому целесообразно использовать алгоритмы косвенного определения НДС, основанные на результатах тензометрических измерений для доступных точек конструкции и решения обратных задач теплопроводности и термоупругости [14, 15]. Для этого разрабатывают математические модели, адекватность которых проверяют в период испытаний, когда имеются прямые экспериментальные данные о напряжениях в опасных точках внутренних поверхностей конструкции. Для определения НДС целесообразно использовать численные методы, обеспечивающие необходимую точность при условии корректного задания температурных полей. К сожалению, расчетные поля температур при быстрых изменениях температуры теплоносителя не всегда обеспечивают достаточную точность результатов из-за неопределенностей в задании исходных данных. Предлагаемый алгоритм расчетно-экспериментального определения температурных полей основан на итерационном процессе построения решения обратной задачи термоупругости для функции изменения температуры теплоносителя и последующем решении прямой задачи теплопроводности для рассматриваемого фрагмента конструкции. Для этого используют экспериментальные данные по напряжениям, возникающим в контрольных точках цилиндрического участка наружной поверхности конструкции. В частности, для определения температуры теплоносителя в рассмотренном выше теплообменнике целесообразно использовать дополнительные тензо-

⁴ **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. Изд 3-е, испр. и доп. — М.: Юрайт, 2020. — 402 с. EDN: FBEDYJ

метрические датчики, установленные на горизонтальном участке трубопровода второго контура (на выходе из ПТО). Расчетно-экспериментальное определение температурного поля предлагается проводить в три этапа:

1) выстраиваем температуру внутренней поверхности, для чего решаем обратную задачу термоупругости; исходными данными служат результаты измерений напряжений на наружной поверхности трубопровода;

2) решаем задачу построения функции изменения температуры теплоносителя в предположении постоянства коэффициента теплоотдачи к стенке конструкции;

3) решаем задачу теплопроводности и определяем температурное поле.

Для построения функции изменения температуры внутренней поверхности измеряемые на наружной поверхности напряжения в интервал времени $[0, \tau_N]$ представим в виде

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^k \varphi_{1+i} \Delta T_{n-i}, \quad (5)$$

где σ_n — напряжения на наружной поверхности в конце интервала времени с номером « n »; φ_{1+i} — матрица преобразования; ΔT_{n-i} — неизвестное линейное повышение температуры на участке разбиения интервала времени с номером $(n-i)$. Элементы матрицы φ_{1+i} являются напряжениями в конце промежутка времени τ_{1+i} , вызванными единичным линейным повышением температуры внутренней поверхности в промежутке времени с номером $(n-i-1, n-i)$. Функция изменения температуры внутренней поверхности и порядок дискретизация функции изменения наружных напряжений приведены на рис. 7.

К сожалению, математическая модель, соответствующая формуле (5), не позволяет использовать переменный шаг $\Delta \tau$ дискретизации функций во времени, так как в этом случае нарушается принцип инвариантности матричного оператора φ_i относительно момента времени τ_i , что значительно усложняет алгоритм вычислений. Создание моделей с переменным шагом — задача дальнейших исследований. Решение уравнений (5) позволяет построить функцию изменения температуры внутренней поверхности конструкции и перейти к решению указанных задач этапов 2 и 3.

Заключение

1. Анализ результатов испытаний средств экспериментального контроля НДС конструкций новых энергетических реакторов показывает, что достигнутый уровень их развития позволяет проводить исследования натурных конструкций

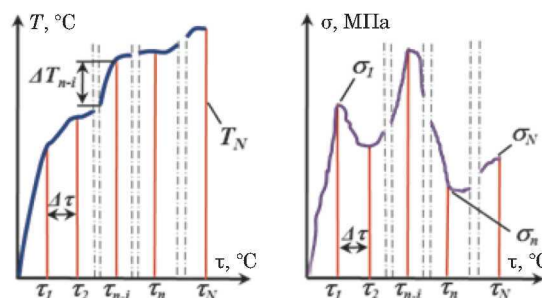


Рис. 7. Дискретизация температуры внутренней поверхности и напряжений на наружной поверхности

Fig. 7. Discretization of the inner surface temperature and stresses on the outer surface

лишь в течение ограниченного периода времени. В то же время проведенные испытания показали, что работоспособность новых образцов герметичных тензорезисторов при температурах до 540 °C сохраняется в течение не менее 500 ч, что достаточно для экспериментальной отработки алгоритмов и создания математических моделей нагружения конструкции.

2. Рассмотренные методы определения и учета базовых характеристик тензорезисторов позволяют минимизировать и достоверно определять погрешности, возникающие в условиях длительных тензоизмерений.

3. Разработанный подход, основанный на обработке данных, получаемых в процессе натурного эксперимента, позволяет свести к минимуму возникающие погрешности и благодаря этому увеличить возможную длительность натурных исследований. Важным направлением совершенствования методов расчетно-экспериментального анализа НДС ответственных элементов конструкций является подход, основанный на применении алгоритмов решения обратных задач с использованием в качестве исходных данных результатов тензоизмерений.

4. Показана возможность применения методов и средств натурной тензометрии для исследования напряженного состояния создаваемых энергоустановок с повышенными эксплуатационными параметрами. В то же время разработанные средства измерений и вновь создаваемые алгоритмы обработки результатов должны совершенствоваться для обеспечения надежного контроля НДС не только в период пусконаладочных испытаний, но и при дальнейшей эксплуатации потенциально опасных объектов энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагаринский А. Ю., Семченков Ю. М., Сидоренко В. А., Фомиченко П. А. Новый этап в ядерно-энергетической стратегии России / Атомная энергия. 2021. Т. 131. № 6. С. 303 – 307. EDN: FUZYOE

2. Babushkin S. V., Vasil'ev B. A., Vasyaev A. V., et al. Reactor Installations with Sodium-Cooled Fast Reactors for Two-Component Nuclear Energy / Atomic Energy. 2020. Vol. 129. N 1. P 8 – 17. EDN: LKACDW. DOI: 10.1007/s10512-021-00705-y
3. Ольховский Г. Г. Наиболее мощные энергетические ГТУ (обзор) / Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 87 – 93. EDN: IYPCCL. DOI: 10.1134/S0040363621060060
4. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Комплексная оценка прочности, ресурса, живучести и безопасности машин в сложных условиях нагружения / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 4. С. 24 – 34. EDN: PNCKQX. DOI: 10.31857/S0235711920040094
5. Баутин А. А. Мониторинг элементов авиационных конструкций по данным тензометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. 1. С. 57 – 63. EDN: YWVSFF. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-57-63
6. Makhutov N. A., Gadenin M. M., et al. Theoretical and Experimental Analysis of Stresses and Strength of Load-Bearing Components of Thermonuclear Tokamak Installations / Nuclear Materials. — London: IntechOpen, 2020. P 1 – 26. EDN: C3JIBOC. DOI: 10.5772/intechopen.94531
7. Албагачиев А. Ю., Алексеева С. И., Ахметханов Р. С. и др. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Отв. редактор Н. А. Махутов. — М.: «Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2019. — 576 с. EDN: UCBZJZ
8. Махутов Н. А., Матвиенко Ю. Г., Романов А. Н. и др. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения. — М.: Ленанд, 2018. — 720 с. EDN: YPBGTB
9. Экспериментальные исследования напряжений в конструкциях. / Под ред. Н. А. Махутова. — М.: Наука, 1992. — 202 с.
10. Маслов С. В., Хуршудов Г. Х., Городов Г. Ф. Исследования напряженного состояния теплообменника реактора БН-600 при пусконаладочных работах и освоении мощности аппарата / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника ядерных реакторов / Научно-технический сборник. Вып. 7(44). — М.: Госкомитет по использованию атомной энергии СССР, 1984. С. 25 – 29.
11. Махутов Н. А., Дайчик М. Л. и др. Методы и результаты исследований напряженного состояния реакторной установки ВВЭР-1000 при эксплуатации. — М.: Международный центр научной и технической информации, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 1992. — 115 с.
12. Маслов С. В. Исследование напряженного состояния действующего оборудования методом тензометрии для уточнения условий прочности и ресурса / Машиностроение и инженерное образование. 2021. № 3 – 4(67). С. 16 – 27. EDN: NFLARX
13. Дайчик М. Л., Пригоровский Н. И., Хуршудов Г. Х. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
14. Razumovskii I. A., Chernyatin A. S., Fomin A. V. Experimental-Computational Methods for Determination the Stress-Strain State of Structural Components / Inorganic Materials. 2014. Vol. 50. N 15. P 1528 – 1536. EDN: UFIVLJ. DOI: 10.1134/S0020168514150151
15. Ватульян А. О., Нестеров С. А. Коэффициентные обратные задачи термомеханики. Том 1. — Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2019. — 146 с.
- egy / Atom. Énergiya. 2021. Vol. 131. N 6. P 303 – 307 [in Russian]. EDN: FUZYOE
2. Babushkin S. V., Vasil'ev B. A., Vasyaev A. V., et al. Reactor Installations with Sodium-Cooled Fast Reactors for Two-Component Nuclear Energy / Atomic Energy. 2020. Vol. 129. N 1. P 8 – 17. EDN: LKACDW. DOI: 10.1007/s10512-021-00705-y
3. Ol'khovskii G. G. The most powerful power-generating GTU's (a review) / Teploénergetika. 2021. Vol. 68. N 6. P 490 – 495 [in Russian]. EDN: MNFETC. DOI: 10.1134/S0040601521060069
4. Makhutov N. A., Gadenin M. M. Integrated Assessment Of The Durability, Resources, Survivability, And Safety Of Machinery Loaded Under Complex Conditions / Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. N 4. P 292 – 300. EDN: OBAXGA. DOI: 10.3103/S1052618820040093
5. Bautin A. A. Monitoring of aircraft structures elements according to strain gauge data / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part 1. P 57 – 63 [in Russian]. EDN: YWVSFF. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-57-63
6. Makhutov N. A., Gadenin M. M., et al. Theoretical and Experimental Analysis of Stresses and Strength of Load-Bearing Components of Thermonuclear Tokamak Installations / Nuclear Materials. — London: IntechOpen, 2020. P 1 – 26. EDN: C3JIBOC. DOI: 10.5772/intechopen.94531
7. Albagachiev A. Y., Alekseeva S. I., Akhmetkhanov R. S., et al. Strength, resource, survivability and safety of machines. N. A. Makhutov, Ed. — Moscow: Librokom, 2019 — 576 p. [in Russian]. EDN: UCBZJZ
8. Makhutov N. A., Matvienko Yu. G., Romanov A. N., et al. Problems of strength, technogenic safety and structural materials science. — Moscow: Lenand, 2018. — 720 p. [in Russian]. EDN: YPBGTB
9. Experimental Investigations of Stresses in the Constractions / Edited by N. A. Makhutov. — Moscow: Nauka, 1992. — 202 p. [in Russian].
10. Maslov S. V., Khurshudov G. Kh., Gorodov G. F. Studies the stress state of the heat exchanger of the BN-600 reactor during commissioning and mastering the power of the device / Problems of nuclear science and technology. Series: Physics and technology of nuclear reactors / Scientific and technical collection. Issue 7(44). — Moscow: Goskomitet po ispol'zovaniyu atomnoi énergii SSSR, 1984. P 25 – 29 [in Russian].
11. Makhutov N. A., Daychik M. L., et al. Methods and results of studies the stress state of the VVER-1000 reactor plant during operation. — Moscow: International Center for Scientific and Technical Information, Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Science, 1992. — 115 p. [in Russian].
12. Maslov S. V. Investigations of the operating equipment stress state by the tensometry method for strength and resource conditions controlling / Mashinostr. Inzh. Obraz. 2021. N 3 – 4(67). P 16 – 27 [in Russian]. EDN: NFLARX
13. Daychik M. L., Prigorovsky N. I., Khurshudov G. Kh. Methods and tools for full-scale tensometry. Handbook. — Moscow: Mashinostroenie, 1989. — 240 p. [in Russian].
14. Razumovskii I. A., Chernyatin A. S., Fomin A. V. Experimental-Computational Methods for Determination the Stress-Strain State of Structural Components / Inorganic Materials. 2014. Vol. 50. N 15. P 1528 – 1536. EDN: UFIVLJ. DOI: 10.1134/S0020168514150151
15. Vatulyan A. O., Nesterov S. A. The coefficient reverse tasks of thermal mechanics. Vol. 1. — Rostov-on-Don: Southern Federal University, 2019. — 146 p. [in Russian]. EDN: OBQJFF

REFERENCES