

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5:621.18

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

EDN KKDMXX

Оригинальная статья / Original paper



Методы и средства обеспечения точности измерений изгибных деформаций стыковочного патрубка между реактором ВВЭР и парогенератором в условиях топливной кампании

Ю.В. Красников¹ , В.П. Поваров² , А.М. Степанов¹ , С.Г. Фиш³

¹ ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
(Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация

³ ООО «РЕСУРС», г. Воронеж, Российская Федерация

stasfish@mail.ru

Аннотация. Зона сварного соединения № 111 представляет собой узел приварки «горячего» коллектора теплоносителя первого контура к патрубку DN1200 парогенератора. Опыт эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 показывает, что зона сварного соединения № 111 склонна к образованию и развитию эксплуатационных дефектов. По результатам периодического неразрушающего контроля зоны сварного соединения № 111, выполненного на ПГ различных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, были неоднократно зафиксированы случаи обнаружения протяженных несплошностей плоскостного типа, в том числе сквозных. Таким образом, указанная зона является одной из наиболее критических зон реакторной установки с ВВЭР-1000. Коренной причины образования и развития эксплуатационных дефектов до сих пор не выявлено. Решение проблемы растрескивания СС № 111 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 является одним из приоритетных направлений повышения безопасности эксплуатации энергоблока в период сверхпроектного срока службы. Указанная проблема определяется комплексным сочетанием температурных условий, механического и коррозионного воздействия, является актуальной и до настоящего времени окончательно не решена. Поэтому, очень важно обеспечить сбор достоверных данных о фактическом напряженно-деформированном состоянии зоны СС № 111 в различных эксплуатационных режимах (нагружение парогенераторов давлением, разогрев/расхолаживание энергоблока, гидроиспытания 1-го и 2-го контуров). Статья раскрывает подходы и этапы создания и применения тензометрической установки с обеспечением метрологической пригодности в условиях топливной кампании кампании на энергоблоке АЭС за счет использования адекватной физической модели для получения аддитивных и мультипликативных поправочных коэффициентов.

Ключевые слова: повышение безопасности, парогенератор, тензометрическая установка, тензопреобразователь, сварное соединение №111.

Для цитирования: Красников Ю.В., Поваров В.П., Степанов А.М., Фиш С.Г. Методы и средства обеспечения точности измерений изгибных деформаций стыковочного патрубка между реактором ВВЭР и парогенератором в условиях топливной кампании. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):61–72 <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

For citation: Krasnikov Yu.V., Povarov V.P., Stepanov A.M., Fish S.G. Methods and means of ensuring the accuracy of bending deformation measurements of connecting pipe between the VVER reactor and the steam generator in the conditions of a fuel campaign. *Global nuclear security*. 2024;14(2):61–72 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

Methods and means of ensuring the accuracy of bending deformation measurements of connecting pipe between the VVER reactor and the steam generator in the conditions of a fuel campaign

Yuri V. Krasnikov ¹ , Vladimir P. Povarov ² , Alexander M. Stepanov ¹ ,
Stanislav G. Fish ³  

¹ VASO ENGINEERING BUREAU LLC, Voronezh, Russian Federation

² Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP),
Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

³ LLC «RESOURCE», Voronezh, Russian Federation

 stasfish@mail.ru

Annotation. The welded joint zone (WJ) No. 111 is a welding unit for the "hot" collector of the primary coolant to the DN1200 steam generator nozzle. The experience of operation of steam generators PGV-1000M of NPP power units with VVER-1000 shows that the WJ zone No. 111 is prone to the formation and development of operational defects. According to the results of periodic non-destructive testing of the WJ No. 111 zone performed at the PG of various power units of the VVER-1000 NPP, cases of detection of extended planar-type discontinuities, including through ones, were repeatedly recorded. Thus, this zone is one of the most critical zones of the reactor plant (RU) with VVER -1000. The root cause of the formation and development of operational defects has not yet been identified. Solving the problem of cracking of WJ No. 111 steam generators of nuclear power plants with VVER-1000 is one of the priority areas for improving the safety of operation of the power unit during the over-design service life. This problem is determined by a complex combination of temperature conditions, mechanical and corrosive effects, is relevant and has not yet been definitively solved. Therefore, it is very important to ensure the collection of reliable data on the actual stress-strain state of the WJ No. 111 zone in various operating modes (pressure loading of steam generators, heating/cooling of the power unit, hydraulic testing of the 1st and 2nd circuits). The article reveals the approaches and stages of creating and applying a strain gauge installation to ensure metrological suitability in the conditions of a campaign fuel company at an NPP power unit by using an adequate physical model to obtain additive and multiplicative correction coefficients.

Keywords: safety improvement, steam generator, strain gauge installation, strain converter, welded joint No.111.

Введение

В статье показаны подходы к измерению изгибных напряжений в условиях изменений температур в различных точках горячей нитки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) на участке от реактора до первого парогенератора (ПГ) в режиме разогрева при пуске энергоблока и в режиме останова энергоблока в момент отключения первого главного циркуляционного насоса (ГЦН). Проведена оценка влияния распределения температурных полей в различных режимах на напряженно-деформированное состояние сварного соединения коллектора теплоносителя с патрубком DN1200 ПГ-1 энергоблока 5 Нововоронежской АЭС.

В статье раскрыт комплексный подход к проектированию измерительной тензометрической установки, работающей автономно в режиме реального времени, на протяжении длительного времени (1-1,5 года) на объекте со сложными условиями. Такая специфика влечет апробацию специальных комплексных подходов, которые представляют определенную научно-техническую новизну.

Данная статья представляет результаты работы, которая является продолжением исследований, изложенных в работах «Разработка и опытное внедрение системы мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения приварки горячего коллектора к корпусу парогенератора

5-го энергоблока Нововоронежской АЭС»¹, «Организация непрерывного многопараметрического мониторинга эксплуатационной повреждаемости СС №111 на примере энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС»², «Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР» [1], «Повышение эксплуатационной надежности сварных соединений парогенераторов для реакторных установок на основе ВВЭР [2]. Отличием настоящих исследований является направленность на повышение точности измерений с метрологическим обеспечением, для возможности их дальнейшего использования для количественного сравнения с цифровыми моделями.

Особенности объекта и условий функционирования оборудования

Внешний вид ГЦТ, сварного соединения (СС) №111 и объекта контроля представлен на рисунке 1.

Особенностью объекта контроля, в части проведения тензометрии сварных швов, является сочетание следующих факторов:

- высоких температур поверхности стыковочного патрубка (+300 °С);

- высоких температур воздуха в помещении в течение всей топливной кампании (+70 °С);
- большого диаметра контролируемого объекта;
- повышенного давления воздуха в атмосфере помещения;
- жестких условий по мощности дозы γ -излучения;
- длительного срока непрерывной работы;
- наличие внутреннего плакирующего слоя;
- наличие градиентов по температуре в процессе запуска и остановки блока;
- высоких уровней промышленных помех из-за близости главных циркуляционных насосов;
- больших перемещений крайних точек заделки объекта контроля;
- необходимость работы без доступа обслуживающего персонала к оборудованию нижнего уровня в течении «топливной кампании».

Это определяет ряд жестких требований к оборудованию и монтажным работам, что потребовало разработки особой технологии на выполнение следующих работ:

- монтаж датчиков и преобразователей с учетом высоких дозовых нагрузок в зоне патрубка и наличия термозащиты на его поверхности;
- монтаж вторичных преобразователей при наличии высокой температуры окружающего воздуха и высокого уровня γ -излучения;
- монтаж датчиков и термопар в стесненных условиях;
- монтаж соединительных проводов и кабелей с учетом отсутствия свободных лотков и проходок.

Эти же факторы потребовали особенного подхода при проектировании оборудования:

- выбор конструкции и комплектующих вторичных нормирующих преобразователей, схем их подключения;
- необходимость в пассивной и активной термокомпенсации измерений;
- наличие тестового и параметрического контроля, надежного метрологического обеспечения;

¹ Бакиров М.Б., Левчук В.И., Еремин А.А., Николаев Д.А., Поваров В.П., Громов А.Ф. Уразов О.В. Разработка и опытное внедрение системы мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения приварки горячего коллектора к корпусу парогенератора 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС // Сборник трудов 136-й Международной научно-технической конференции «Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», Нововоронеж, 2014. – Нововоронеж: ООО «Комфорт-Сервис», 2014. – С. 483–499.

² М.Б. Бакиров, А.А. Еремин, В.И. Левчук, В.П. Поваров. Опыт работ по использованию системы непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла в наиболее критических зонах ответственного оборудования АЭС на примере СС №111 энергоблока №5 Нововоронежской АЭС // Сборник трудов 9-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2015. – С. 240–248

– формирования структурной и аппаратурной избыточности, дублирования измерительных каналов;

– обеспечения физической защиты датчиков, термопар, кабелей и соединительных колодок в условиях этапа ремонта энергоблока.

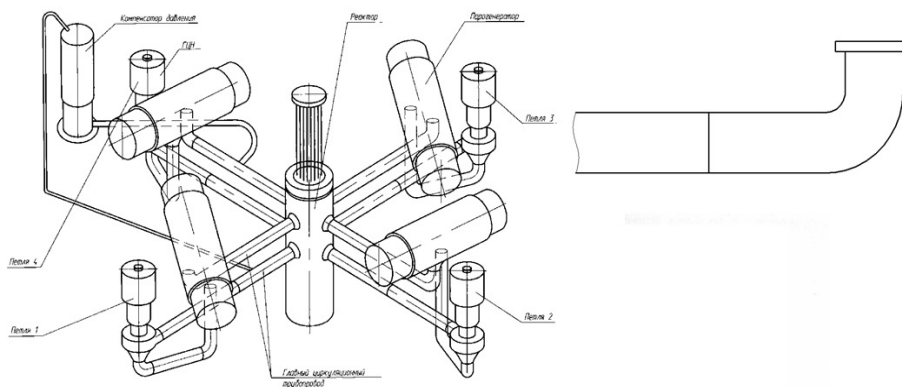


Рисунок 1. Вид ГЦТ, СС №111 и объекта контроля³
Figure 1. Type of MCP, WJ No.111 and the object of control³

На горячей нитке ГЦТ смонтированы тензопреобразователи и термопары в двух сечениях, а также тензометрические розетки с абсолютным дублированием всех измерительных каналов (рис. 2)

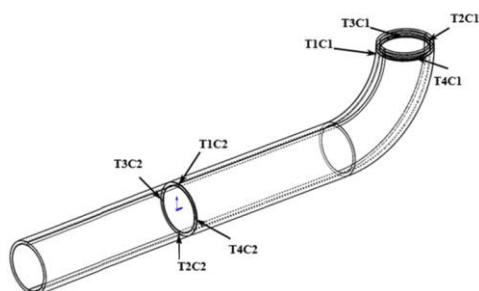


Рисунок 2. Схема размещения оборудования на контрольном трубопроводе и тензометрических розеток на ГЦТ [составлено авторами]

Figure 2. Diagram of equipment placement on the control pipeline and strain gauge sockets on the MCP [compiled by the authors]

Выбор тензорезистора АWH-8-7F-2(11)-11.0 в качестве первичного измерительного преобразователя обоснован его термостойкостью, возможностью монтажа посредством приварки и наличием в реестре средств измерения Российской Федерации №76555-19.

Осуществление монтажа тензорезисторов посредством приклеивания не представляется возможным из-за высоких температур поверхности трубопровода. Также данный тензорезистор имеет модуль пассивной температурной компенсации НТG-A1.

Структура измерительной установки

Структурная схема измерительной установки представлена на рисунке 3. В каждом сечении трубопровода монтируются две группы тензометрических розеток (ТР) ТР1 ÷ ТР6 с термопарами (ТП) ТП1 ÷ ТП6.

Для обеспечения их функционирования используется две тензометрические станции (ТС) – СТ1 и СТ2 с возможностью подключения 16 тензометрических розеток и 16 термопар каждая. Каждая из станций получает питание 12 В постоянного тока от отдельной секции рабочей станции РС и обеспечивает на передачу информации на данную рабочую станцию по последовательному интерфейсу [3].

³ Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР-1000). – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%AD%D0%A0-1000> (дата обращения: 18.05.2024)

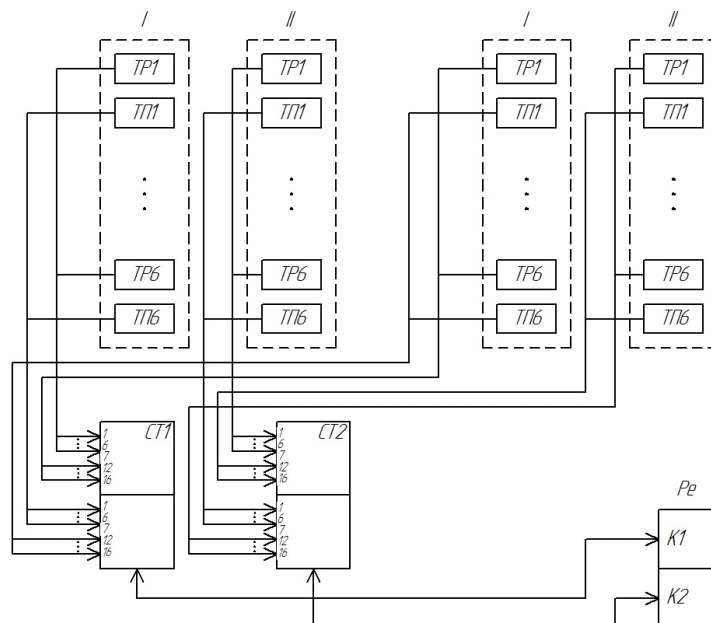


Рисунок 3. Структурная схема измерительной установки [составлено авторами]
Figure 3. Block diagram of the measuring unit [compiled by the authors]

Рабочая станция имеет две независимых секции с раздельным питанием от сети 220В 50 Гц, каждая из которых содержит отдельный сервер для обработки и накопления информации. Благодаря независимости тензометрических станций и серверов реализована стопроцентная избыточность для замещения выпавших каналов.

Станции тензометрические выполнены на базе нормирующего преобразователя на основе AD7730, на каждый вход/выход тензометрической розетки [0,0]

Схема расположения измерительных точек и размещения тензопреобразователей, термопреобразователей при двухканальном контроле (схема полного дублирования) представлена на рисунке 4.

На рисунках 5-8 представлен внешний вид подготовленного к монтажу трубопровода и установленного шаблона, станции СТТС-16/16Т, смонтированных соединительных коробок и элементов монтажа.

После выполнения разметки на трубопроводе размещается шаблон и затягивается талреп до выбора зазоров между трубопроводом и шаблоном (рис. 5). Монтаж тензорезисторов и термопар, а также их защитных элементов выполняются по данному шабло-

ну. Шаблон остается на трубопроводе на весь период измерения.

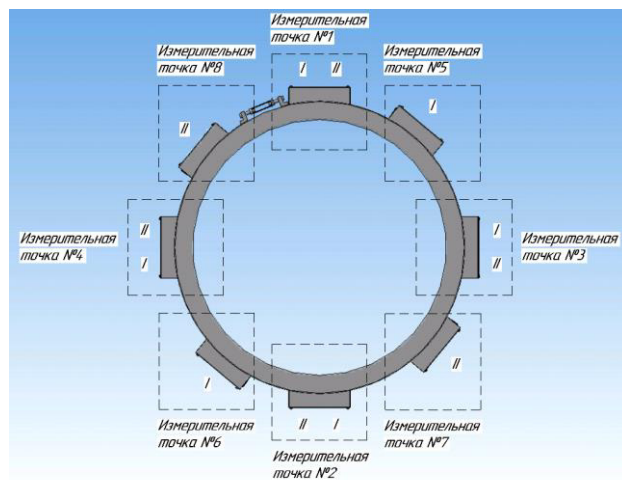


Рисунок 4. Схема расположения измерительных точек на сечении: I – тензопреобразователи, термопреобразователи первого канала «Красный»; II – тензопреобразователи, термопреобразователи второго канала «Синий»
[составлено авторами]

Figure 4. The layout of the measuring points on the cross section: I – strain gauges, thermal converters of the first channel «Red»; II – strain gauges, thermal converters of the second channel «Blue»
[compiled by the authors]

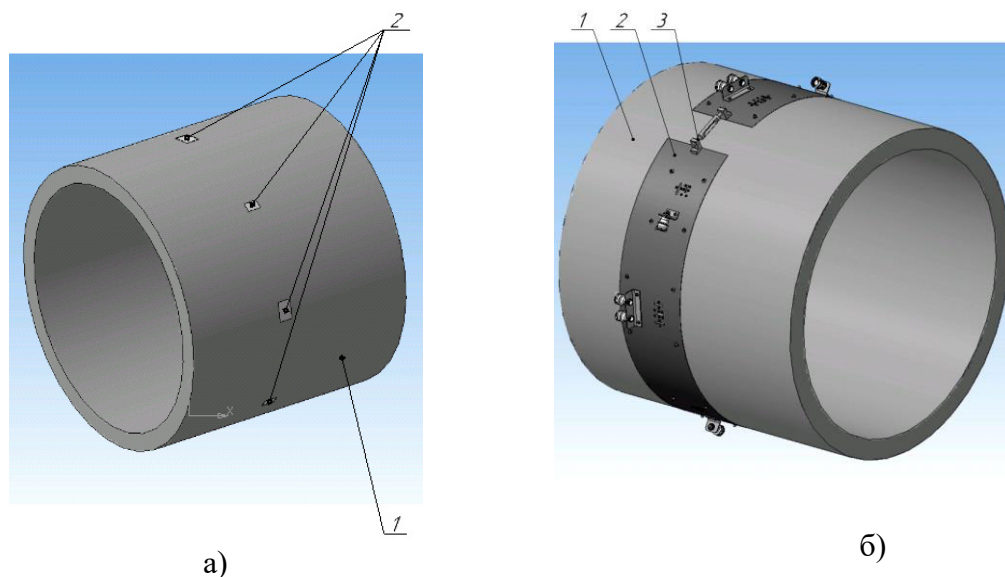


Рисунок 5. Внешний вид подготовленного к монтажу трубопровода (а) и установленного шаблона (б): 1 – трубопровод; 2 – места обработки трубопровода; 3 – шаблон; 4 – талреп
[составлено авторами]

Figure 5. The design of pipeline prepared for installation (a) and the installed template (b): 1 – pipeline; 2 – pipeline processing points; 3 – template; 4 – lanyard [compiled by the authors]

Станция тензо-термометрическая специальная СТТС-16/16Т системы измерительной выполнена в металлическом корпусе (рис. 6). На передней панели расположены винты резисторов грубой и точной настройки, закрытые колпачками. На нижней панели

расположены 32 разъема «ВХОДЫ КАНАЛОВ» для подключения датчиков измерительных каналов, 2 разъема для подключения к управляющей вычислительной машины (ВМ). На боковых панелях расположены элементы светодиодной индикации.

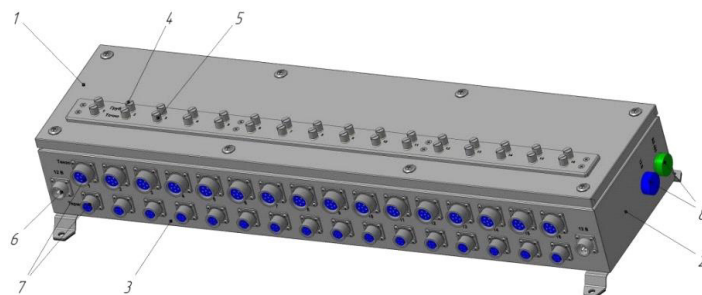


Рисунок 6. Внешний вид станции СТТС-16/16Т: 1 – панель передняя; 2 – панель боковая; 3 – панель нижняя; 4 – винты регулировки резисторов грубой настройки; 5 – винты регулировки резисторов точной настройки; 6 – разъем для подключения к управляющей ПЭВМ; 7 – разъемы «ВХОДЫ КАНАЛОВ» для подключения датчиков измерительных каналов; 8 – элементы светодиодной индикации [составлено авторами]

Figure 6. STTS-16/16T station design: 1 – front panel; 2 – side panel; 3 – bottom panel; 4 – adjustment screws for coarse adjustment resistors; 5 – adjustment screws for fine adjustment resistors; 6 – connector for connection to the controlling PC; 7 – «CHANNEL INPUTS» connectors for connection of measurement channel sensors; 8 – LED indication elements [compiled by the authors]

На рисунках 7, 8 представлен внешний вид смонтированных соединительных коробок и элементов монтажа.

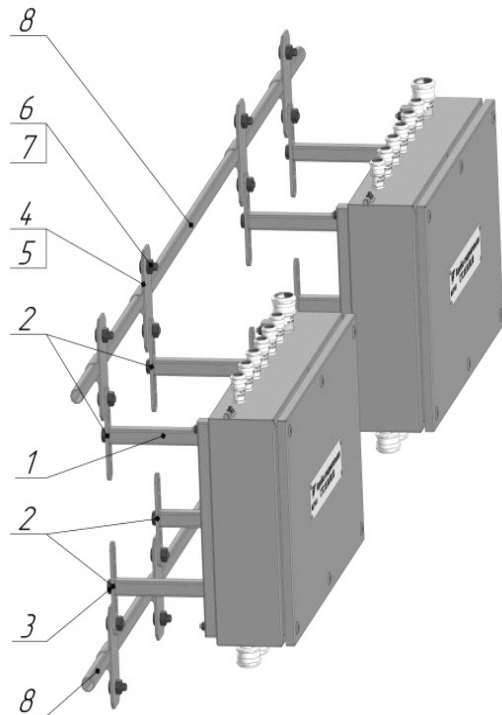


Рисунок 7. Внешний вид смонтированных соединительных коробок: 1 – кронштейн; 2 – проставка; 3,6 – болт M10; 4 – зацеп; 5 – пластина; 7 – гайка M10; 8 – перила [составлено авторами]
Figure 7. Mounted connection boxes design: 1 – bracket; 2 – spacer; 3,6 – M10 bolt; 4 – hitch; 5 – plate; 7 – M10 nut; 8 – handrail [compiled by the authors]

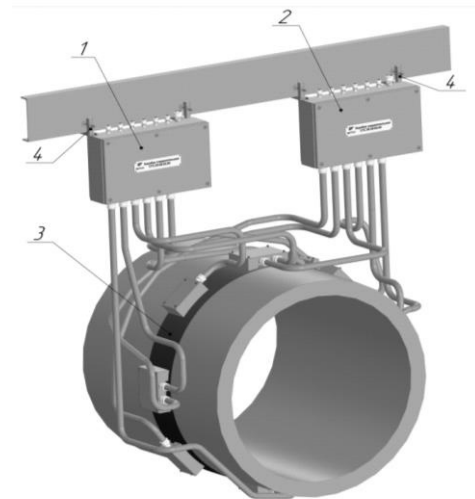


Рисунок 8. Внешний вид смонтированного оборудования в помещении трубопровода: 1 – коробка соединительная первого канала; 2 – коробка соединительная второго канала; 3 – сборка тензометрическая на контролируемом трубопроводе; 4 – кронштейны для фиксации коробок соединительных [составлено авторами]
Figure 8. Mounted equipment in the pipeline room: 1 – connection box of the first channel; 2 – connection box of the second channel; 3 – strain gauge assembly on the controlled pipeline; 4 – brackets for fixing connection boxes [compiled by the authors]

Методы и средства компенсации влияющих факторов, реализованные в установке
В оборудовании реализованы подходы к компенсации источников погрешности, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1. Подходы к компенсации источников погрешности [составлено авторами]
Table 1. Approaches to compensation of error sources [compiled by the authors]

Источники погрешности	Способ компенсации
1. Контактные сопротивления и их изменения от температуры	Применение шестипроводной схемы питания измерительного моста
2. ТермоЭДС в местах электрических соединений.	Применение питания измерительного моста переменным током типа «меандр» с синхронным цифровым детектированием
3. Синфазная составляющая помехи	Применение «свободного» инструментального дифференциального входа Применение синхронного детектирования при питании измерительного моста напряжением «меандр» с частотой, кратной частоте питания ГЦН
4. Влияние неинформативных деформаций (например, от изменения избыточного давления теплоносителя в трубопроводе) и температурных деформаций.	Использование физической модели трубопровода с нагружением в термошкафу

Описание лабораторного стенда

Для выполнения имитационной градуировки и реализации активной термокомпенсации использовалось физическое моделирование объекта и условий функционирования.

Лабораторные испытания подразделялись на «холодные» и «горячие», в их основе лежит использование функциональной модели объекта контроля.

Физическая модель объекта, изготавливаемого из заготовки аналогичной трубы с плакировочным слоем, показана на рисунке 9. Химический состав модели после механической обработки соответствует материалам ГЦТ.

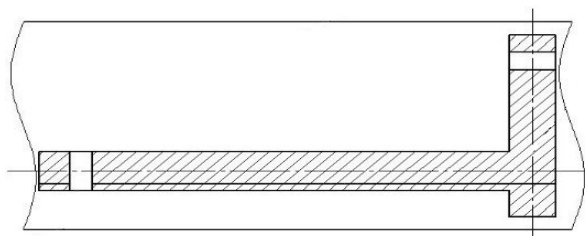


Рисунок 9. Схема изготовления модели
[составлено авторами]

Figure 9. Model manufacturing scheme [compiled by the authors]

При разработке физической модели исходили из следующих соображений:

- в качестве объекта взяты контрольные сечения С1 и С2 (см. рис. 2);
- в контрольном сечении объект испытывает изгибные деформации, а кручение не рассматривается;
- деформации за счет изменения давления внутри трубы не учитывались, так как были предусмотрены тензорезисторы для измерения деформации трубы за счет давления;
- при построении модели ставилась задача выбора ее геометрических характеристик, сечения и длины для обеспечения в координатах размещения контрольных тензорезисторов расчетных прогнозируемых механических напряжений;
- для обеспечения максимально адекватной физической модели соотношение основного металла и плакировочного слоя соответствовали конструкции штатного патрубка;

– в качестве входных параметров модели выбраны изменяемая нагрузка в приложении к консольной части жестко заделанной балки, показанной на рисунке 10, в диапазоне от 0 до 100% расчетной нагрузки и температура физической модели в диапазоне от 25 до 450 °С.

Главный принцип изготовления модели – сохранение пропорций в соотношении в сечении балки основного металла и плакировочного слоя.

Схема размещения тензометрических розеток и нагружения модели представлена на рисунке 10.

Предварительные размеры модели получены расчетным путем⁴ [6], чтобы предполагаемые деформации в модели стенда имели такой же диапазон значений, что и в контрольных сечениях ГЦТ.

Тензометрические розетки подключаются ко входам станции тензометрической. При нагружении гирями с нормальными условиями, была проведена оценка начальный коэффициент преобразования (НКП) и рабочий коэффициент преобразования (РКП) данной модели, случайной погрешности измерений, выполнена балансировка тензопреобразователей и оценка изгибных деформаций.

Для создания испытательного «горячего» стенда данная конструкция помещается в тигельную (муфельную) печь, показанную на рисунке 11, по обозначенной схеме.

При запуске печи на разогрев в диапазоне 20 °С – 300 °С при помощи контроллера печи выставляют токи стабилизации 100 °С, 150 °С, 200 °С, 250 °С, 300 °С.

При установившихся температурах определяются:

- НКП (значение на выходе без нагружения);
- значения выходного сигнала при приложении 20%, 40%, 60%, 80% и 100% расчетной нагрузки для модели в диапазоне тензочувствительности тензорезисторов;

⁴ ПНАЭ Г 7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Режим доступа: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842075.pdf> (дата обращения: 18.05.2024).

- вычисляются коэффициенты влияния температуры на НКП и РКП (чувствительность измерительной схемы).

Для датчиков сжатия № 1 и 2 при повышении температуры растут показания смещения нуля. Зависимость составляет $6,6 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Для датчиков растяжения № 3 и 4 при повышении температуры показания нуля уменьшаются. Зависимость составляет

$5,5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Ранее было выявлено, что наибольшее значение выходного напряжения, зарегистрированное за время выхода РУ на рабочие параметры, составляет 2000 мкВ , что соответствует деформации $\epsilon = 0,055\%$.

На рисунке 12 представлена зависимость выходного напряжения тензодатчиков от температуры.

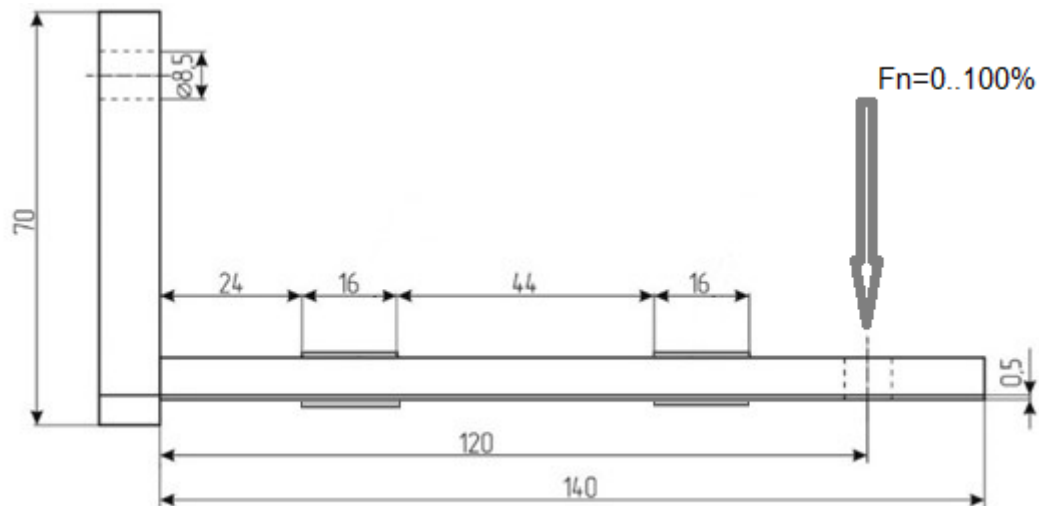


Рисунок 10. Расположение тензометрических розеток для моделирования деформаций в сечениях трубопровода [составлено авторами]

Figure 10. Location of strain gauge sockets for modeling deformations in pipeline sections [compiled by the authors]

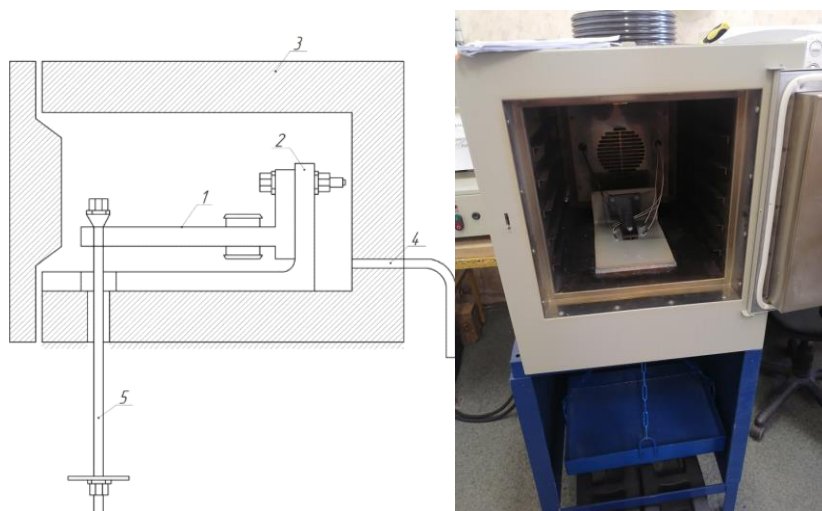


Рисунок 11. Схема размещения оборудования стенда в печи и внешний вид стенда: 1 – модель; 2 – основание; 3 – печь; 4 – кабельный ввод; 5 – нагрузочное устройство [составлено авторами]

Figure 11. The layout of the stand equipment in the furnace and the stand design: 1 – model; 2 – base; 3 – furnace; 4 – cable gland; 5 – load device [compiled by the authors]

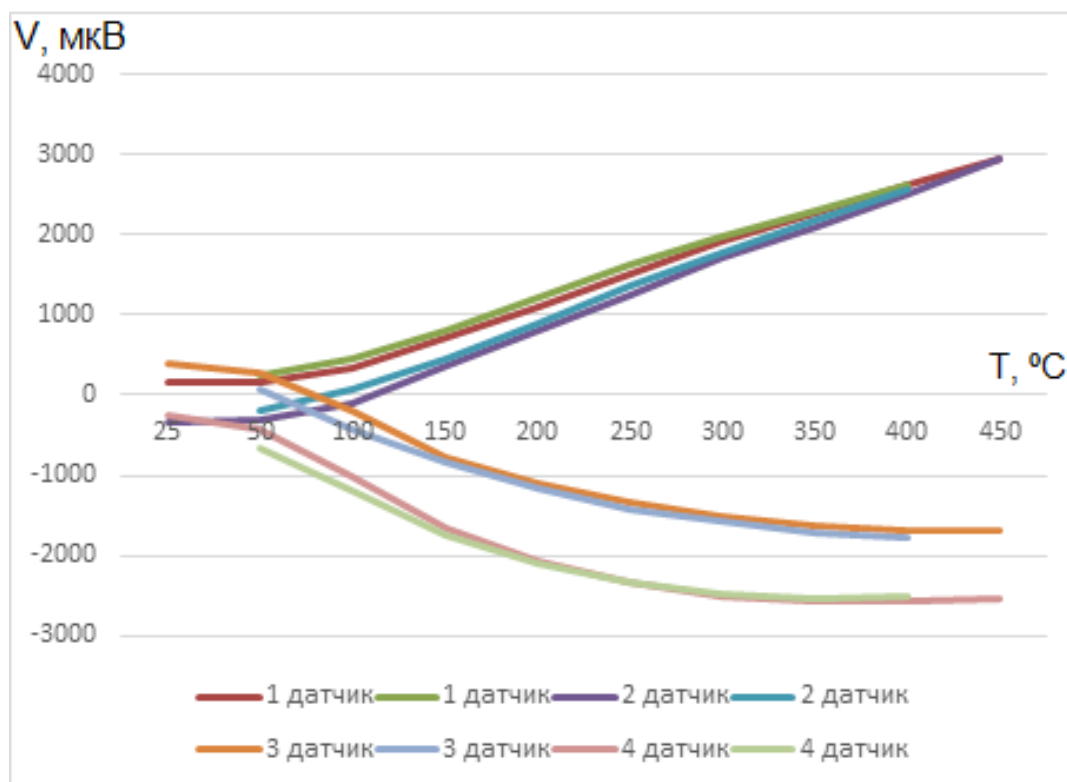


Рисунок 12. Выходное напряжение тензопреобразователей в зависимости от температуры
[составлено авторами]

Figure 12. Output voltage of strain gauges depending on temperature [compiled by the authors]

Локальный перепад температуры не превышает 2 °С, что находится на уровне погрешности измерения. Локальный перепад температуры практически не оказывает влияния на изгибные напряжения. Изменения температуры в целом трубопровода оказывают основной вклад в изменения деформаций.

Выводы

1. Данная измерительная задача реализуется с учетом всех возможных негативных факторов, влияющих на погрешность измерений:

- широкий диапазон температур;
- высокий уровень электромагнитной помехи;
- высокий фон гамма-излучения, исключающий размещение аппаратуры вблизи объекта.

2. Реализована активная термокомпенсация с использованием коэффициентов, по-

лученных при исследованиях модели объекта.

3. Благодаря независимости тензометрических станций и серверов реализована стопроцентная избыточность для замещения выпавших каналов.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что принятый комплексный подход к проектированию показал свою состоятельность, а накопленный опыт продемонстрировал, что измерение напряжений элементов реакторной установки возможно проводить с высокой точностью и надежностью.

Это может быть востребовано не только для поиска отклонений, причин дефектов, но и в качестве мониторинга в режиме реального времени, наряду с такими параметрами как давление, температура, химический состав теплоносителя, реактивность и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Саакян С.П., Чепурко В.А. Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР. *Вестник кибернетики*. 2017;(2/26):24–31. Режим доступа: <https://www.vestcyber.ru/jour/article/view/59> (дата обращения: 15.05.2024).
Povarov V.P., Sahakian S.P., Chepurko V.A. Statistical analysis of data on damage to the collector welding unit to the nozzle of a steam generator of a nuclear power plant with VVER. *Bulletin of Cybernetics*. 2017;(2/26):24–31. Available at: <https://www.vestcyber.ru/jour/article/view/59> (accessed: 15.05.2024).
2. Подрезов Н.Н., Томилин С.А., Шишов В.В. Повышение эксплуатационной надежности сварных соединений парогенераторов для реакторных установок на основе ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;(4):22–26. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.4-3.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
Podrezov N.N., Tomilin S.A., Shishov V.V. Operational reliability increase of welded connections of steam generators for PWR reactor installations. *Global nuclear safety*. 2016;(4):22–26. Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.4-3.pdf> (accessed: 10.05.2024).
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 304 с. Режим доступа: <https://www.znvo.kz/books/42-pnpnpn/546-gutnikov.html> (дата обращения: 13.05.2024).
Gutnikov, V.S. Integrated electronics in measuring devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 304 p. Available at: <https://www.znvo.kz/books/42-pnpnpn/546-gutnikov.html> (accessed: 13.05.2024).
4. Макаров Р.А., Ренский А.Б., Боркунский Г.Х., Этингер М.И. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975. 287 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006975341?ysclid=lwklxavno0242839252> (дата обращения: 15.05.2024).
Makarov R.A., Rensky A.B., Borkunsky G.H., Etingof M.I. Tensometry in mechanical engineering. A reference guide. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 287 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006975341?ysclid=lwklxavno0242839252> (accessed: 15.05.2024).
5. Литвак В.И. Тензореле. Расчет. Конструирование. Применение. Москва: Машиностроение, 1989. 158 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001464483?ysclid=lwkm0ddgb4930102262> (дата обращения: 17.05.2024).
Litvak V.I. Tensorele. Calculation. Design. Application. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 160 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001464483?ysclid=lwkm0ddgb4930102262> (accessed: 17.05.2024).
6. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. Москва: Наука, 1990. 238 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001527740> (дата обращения: 18.05.2024).
Parton V.Z. Mechanics of destruction: from theory to practice. Moscow: Nauka, 1990. 238 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001527740> (accessed: 18.05.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Красников Ю.В. – выбор методов решения, конструирование тензометрической станции, метрологическое обеспечение;
Поваров В.П. – постановка задачи, анализ результатов;
Степанов А.М. – конструирование тензометрической станции, анализ натурных результатов, подготовка текста статьи;
Фиш С.Г. – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Исследование выполнено без дополнительных источников финансирования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Krasnikov Yu.V. – selection of solution methods, design of a strain gauge station, metrological support;
Povarov V.P. – statement of the problem, analysis of results;
Stepanov A.M. – design of a strain gauge station, analysis of full-scale results, preparation of the article text;
Fish S.G. – carrying out numerical calculations, preparing the text of the article.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Юрий Владимирович Красников, кандидат технических наук, директор, главный конструктор ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0396-1788>
e-mail: secretar@metrol.ru

Владимир Петрович Поваров, доктор технических наук, директор Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>
e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Александр Михайлович Степанов, начальник НИР ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7967-2419>
e-mail: root@metrol.ru

Станислав Геннадьевич Фиш, кандидат технических наук, заместитель директора по развитию ООО «РЕСУРС», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5970-4023>
e-mail: stasfish@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024
После доработки 28.05.2024
Принята к публикации 06.06.2024

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare that there is no conflict of interest

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Yuri V. Krasnikov, Can. Sci. (Engin.), Head, Chief Designer, LLC «Engineering Bureau of VASO», Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0396-1788>
e-mail: secretar@metrol.ru

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of Novovoronezh Nuclear Plant the Branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>
e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Alexander M. Stepanov, Head of the Scientific Research Department, LLC «Engineering Bureau of VASO», Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7967-2419>
e-mail: root@metrol.ru

Stanislav G. Fish, Can. Sci. (Engin.), Deputy Director for Development, «RESOURCE» LLC, Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5970-4023>
e-mail: stasfish@mail.ru

Received 26.03.2024
Revision 28.05.2024
Accepted 06.06.2024