

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ВВЭР

Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Замиусский В.Н., Савинов А.А., Бударин А.А., Шутов С.С., Шутов П.С., Лукьянов Д.А.

Акционерное общество «Научно-технический центр «Дианром» (АО «НТЦД»), 111020, г. Москва, ул. 2-я Синичкина, д. 9А, стр. 3



Рассмотрены вопросы разработки современных акустических систем контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР в части удовлетворения современным требованиям концепции «течь перед разрушением». Для акустической системы контроля течи теплоносителя как системы, важной для безопасности АЭС, в целях удовлетворения современным требованиям к системам контроля течи теплоносителя предложены научно-технические решения таких важных вопросов, как расширение динамического диапазона контролируемых величин течей теплоносителя, достоверность результатов установления факта течи и точность измерения величины и места течи теплоносителя, а также повышение технологичности и снижение трудоемкости выполнения работ по обслуживанию технических средств канала измерительного акустического, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения. Современные акустические системы контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР удовлетворяют требованиям патентной чистоты при поставках акустических систем контроля течи на отечественные и зарубежные АЭС. Рассмотрена структура построения и основные технические характеристики комплекса технических средств системы акустического контроля течи. Отмечено, что предложенная система акустического контроля течи в рамках концепции «течь перед разрушением» удовлетворяет современным требованиям по чувствительности, быстродействию, точности измерения величины и места течи, применима для трубопроводов и оборудования второго контура реакторных установок ВВЭР. Современные акустические системы контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования получили конкретное практическое применение на АЭС с реакторными установками ВВЭР.

Ключевые слова: контроль течи, трубопровод, оборудование, датчик акустический, комплекс технических средств, система, реакторные установки.

Для цитирования: Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Замисский В.Н., Савинов А.А., Бударин А.А., Шутов С.С., Шутов П.С., Лукьянов Д.А. Опыт разработки современных акустических систем контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.06>

ВВЕДЕНИЕ

Для современного этапа развития атомной энергетики характерно возрастание требований к безопасности эксплуатации АЭС. Безопасность обеспечивается путем последовательной реализации принципа глубоко эшелонированной защиты, которая основана на применении системы барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ, а также путем использования набора технических и организационных мер по защите барьеров. Одним из элементов системы технических и организационных мер является оснащение АЭС автоматизированными системами диагностики. Это позволило выявлять аномалии в состоянии реакторной установки (РУ) на ранней стадии их возникновения при работе на мощности [1, 2].

Среди многочисленных задач диагностирования на реакторных установках с водяным теплоносителем приоритетное место занимает раннее обнаружение протечек теплоносителя из первого и второго контуров циркуляции. В основе современного подхода к созданию систем обнаружения протечек контуров циркуляции лежит концепция «течь перед разрушением» (ТПР), основывающаяся на известном факте, что полное разрушение трубопровода не происходит, если начальный дефект не превышает критической величины. В этом случае важно своевременно обнаружить течь и безопасно остановить реактор, чтобы провести ремонтные работы [1–4]. Поэтому вопросу раннего обнаружения течей теплоносителя придается особое значение.

Определение величины и места течи теплоносителя относится к наиболее трудоемкой операции в области неразрушающего контроля. Для технического обеспечения концепции ТПР в проектах реакторных установок с ВВЭР предусматриваются системы обнаружения течей теплоносителя в первом и втором контурах циркуляции. Для повышения надежности обнаружения, как правило, предполагается применение не менее трех систем, работающих на различных физических принципах. Приоритетное место среди них отводится акустическим системам [5].

Статья «Разработка системы акустического контроля течей» [5] посвящена первой отечественной многоканальной автоматизированной акустической системе контроля течи теплоносителя, получившей сокращенное название САКТ. В статье достаточно подробно описывается назначение системы, объект диагностирования, состав и технические характеристики комплекса технических средств (КТС) САКТ, принцип и алгоритм функционирования системы, выполнение в автоматическом круглосуточном режиме работы информационных функций (непрерывное измерение сигналов датчиков акустических по всем задействованным каналам, оценка и сравнение параметров сигналов с уставками; обнаружение течи оборудования; сбор, накопление и долговременное хранение регистрируемой информации с возможностью вывода архивированных данных по запросу оперативного персонала; обработка информации) и вспомогательных функций (контроль работоспособного состояния технических средств САКТ, сигнализация о нарушениях в работе элементов

системы, поддержание единого времени с системами энергоблока), рассмотрены вопросы создания программного обеспечения, представлены результаты испытаний представительской части САКТ. Безусловно, опыт разработки и внедрения первой отечественной многоканальной автоматизированной акустической системы контроля течей теплоносителя имеет большое значение в плане повышения безопасной эксплуатации РУ ВВЭР. Однако в настоящее время в целях удовлетворения вновь введенным требованиям к системам контроля течей теплоносителя [4] как к системам, важным для безопасности АЭС, наряду с решением задачи обеспечения работоспособности КТС САКТ в условиях внешних воздействующих факторов (ВВФ), характерных для АЭС (сейсмических, механических, климатических, радиационных, электромагнитных, коррозионных и других), необходимо решение таких важных задач, как расширение динамического диапазона контролируемых величин течей теплоносителя, достоверность результатов установления факта течи и определение параметров (величины и места) течи теплоносителя, а также повышение технологичности и снижение трудоемкости выполнения работ по обслуживанию технических средств канала измерительного акустического (КИА) САКТ, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КТС САКТ

Для решения отмеченных выше задач специалистами Акционерного общества «Научно-технический центр «Диапром» (АО «НТЦД») предложен ряд технических решений, на которые получены патенты на изобретения под названиями «Система акустического контроля течи трубопровода АЭС» [6], «Канал измерительный акустический» [7], «Система контроля течи теплообменника системы пассивного отвода тепла акустическим методом» [8]. Сущность решений, отмеченных в [6, 8], заключается в изменении структуры построения КТС САКТ, представленной в [5], в которой сигналы от датчиков акустических (ДА) по длинным аналоговым линиям связи поступают на усилительно-преобразовательные модули, размещаемые в шкафу программно-технического комплекса (ПТК), на структуру, в которой усилительно-преобразовательные модули объединены в единый самостоятельный конструктив – блок обработки сигналов (БОС), обладающий свойством автономности, что позволяет разместить БОС в непосредственной близости к гермопроходке вне гермозоны РУ ВВЭР. Это уменьшает длину аналоговых линий связи от акустических датчиков до усилительно-преобразовательных модулей БОС и за счет этого уменьшается ослабление сигнала в аналоговых линиях связи, передаваемого от акустических датчиков на БОС. Наличие цифровой линии связи, в которой не происходит ослабление сигналов, позволяет передать сигналы с выхода блока обработки сигналов на вход вычислительного устройства ПТК САКТ для реализации алгоритма работы системы в неискаженном виде. Такая организация структуры элементов предложенной системы и их связей между собой увеличивает чувствительность системы к обнаружению малых течей и этим расширяет динамический диапазон контролируемых величин течей теплоносителя, улучшает технологичность прокладывания аналоговых линий связи, при этом также значительно снижается количество дорогостоящей кабельной продукции для изготовления аналоговых линий связи, число которых доходит до 70-ти штук и более на один энергоблок, а с учетом системы акустического контроля течи теплоносителя второго контура (САКТ-2К) и системы контроля течи теплообменников системы пассивного отвода тепла (СКТТ СПОТ) акустическим методом количество линий связи доходит до 150-ти штук и более. Следует отметить,

что предложенная система акустического контроля течи трубопровода АЭС применима и вне гермооболочки АЭС для трубопроводов и оборудования второго контура РУ ВВЭР, включая теплообменники системы пассивного отвода тепла.

Технические решения предложенного канала измерительного акустического [7] помимо выполнения основной функции – установления факта наличия течи трубопровода – обеспечивают повышение технологичности, снижение трудоемкости и продолжительности работ по техническому обслуживанию технических средств КИА САКТ, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения за счет использования в конструкции датчиков акустических, аналоговых линий связи, включая коробки коммутационные, разъемных соединителей, применения быстросъемной конструкции крепления акустических датчиков на трубопроводах РУ ВВЭР. Тем самым существенно повышается безопасность выполнения операций оперативным персоналом по обслуживанию канала измерительного за счет возможности быстрого соединения (разъединения) элементов, быстрого их монтажа (демонтажа), быстрой их замены в случае необходимости. Так, например, продолжительность проведения операции по замене акустического датчика в предложенной конструкции акустического измерительного канала занимает на порядок меньше времени по сравнению с проведением этой же операции на канале, где акустический датчик установлен методом приварки к волноводу, приваренному к трубопроводу [5]. С учетом того, что техническое обслуживание канала в гермозоне проводится в условиях интенсивного ионизирующего излучения и количество каналов акустического контроля течи может достигать нескольких десятков на один блок АЭС, становится понятной значимость предложенного технического решения в обеспечении безопасности эксплуатации канала, в снижении дозовых нагрузок на обслуживающий персонал.

Решению вопроса достоверности результатов установления факта течи и определения параметров (величины и места) течи теплоносителя уделено особое внимание. Сущность технических решений, направленных на обеспечение достоверности получаемой информации, заключается в контроле работоспособного состояния технических средств САКТ. Для этих целей специалистами АО «НТЦД» разработан ряд оригинальных технических решений, обеспечивающих проверку сохранности (несохранности) в допустимых пределах технических характеристик каналов измерительных акустических КИА (акустических датчиков, аналоговых линий связи, усилительно-преобразовательных модулей БОС) с помощью каналов тестовых сигналов, построенных на базе преобразователей акустических (ПА), а также проработаны технические решения по контролю работоспособного состояния ПТК. Оригинальность технических решений заключается в том, что наряду с решением основной задачи по обеспечению проверки технических характеристик КИА решены вопросы оптимизации размещения ПА на трубопроводах ГЦК, вопросы унификации конструкции и способов крепления технических средств КИА и каналов тестовых сигналов (преобразователи акустические, аналоговые линии связи, блок генераторов тестовых (Блок Г); тем самым все преимущества КИА – технологичность, низкая трудоемкость и продолжительность работ по обслуживанию технических средств, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения распространяются и на каналы тестовых сигналов.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КТС САКТ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ КОНЦЕПЦИИ ТПР

Принципы построения КТС систем контроля течи теплоносителя (СКТ) акустическим методом, в том числе подсистемы акустического контроля (ПАК), системы акустического контроля течи теплоносителя первого контура (САКТ), системы обнаружения течи теплоносителя второго контура (СОТТ-2) и входящих в ее состав системы акустического контроля течи теплоносителя второго контура (САКТ-2К), системы контроля течи теплообменников системы пассивного отвода тепла (СКТТ СПОТ) акустическим методом практически идентичны, поэтому рассмотрим структуру построения КТС на примере системы акустического контроля течи теплоносителя первого контура (САКТ) энергоблока № 1 Курской АЭС-2.

Структурная схема КТС САКТ энергоблока № 1 Курской АЭС-2 представлена на рис. 1.

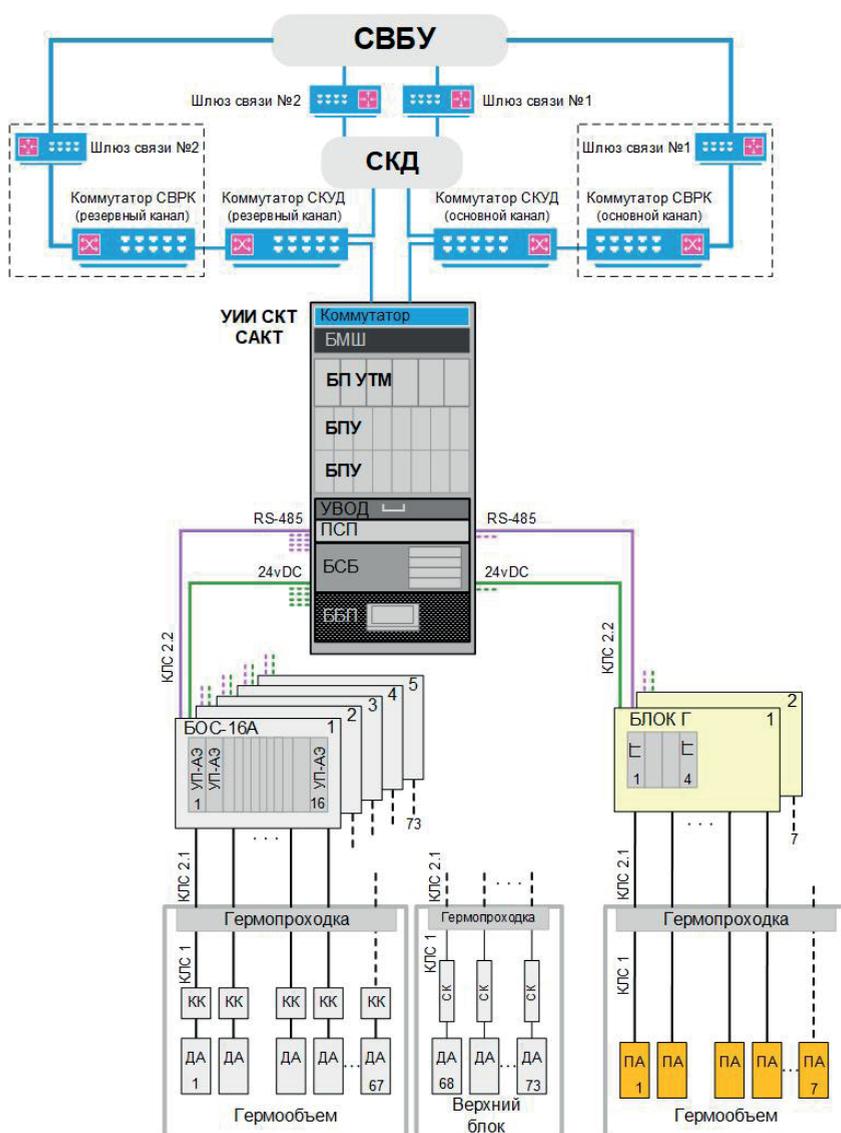


Рис. 1. Структурная схема САКТ

В состав КТС САКТ входят датчики акустические (ДА – 73 шт.); преобразователи акустические (ПА – 7 шт.); аналоговые кабельные линии связи (КЛС 1, КЛС 2.1), включающие в себя коробки коммутационные (КК – 67 шт.), спецкабели (СК – 6 шт.), а также соответствующие контактные группы гермопроходок; блоки обработки сигналов (БОС–16А – 5 шт.), каждый из которых включает в себя усилительно-преобразовательные модули (УП–АЭ – 16 шт.); блоки генераторов тестовых (Блок Г – 2 шт.) с генераторами тестовыми (ГТ – 7 шт.); цифровые кабельные линии связи RS 485 (КЛС 2.2); программно-технический комплекс (ПТК) на базе устройства информационно-измерительного (УИИ СКТ – 1 шт.).

САКТ обеспечивает обнаружение течи теплоносителя следующего оборудования и трубопроводов энергоблока № 1 Курской АЭС-2 (РУ ВВЭР–ТОИ): ГЦТ; трубопроводы САОЗ; трубопроводы системы компенсации давления (КД); патрубки ИПУ КД; компенсатор давления КД; верхний блок реактора (ВБ).

В статье [5], как отмечено выше, достаточно подробно описаны принцип действия и алгоритм функционирования системы САКТ, поэтому остановимся на отличительных особенностях технической реализации отдельных элементов и системы в целом с учетом технических решений, отмеченных в патентах на изобретения [6–8].

Принцип действия системы САКТ основывается на преобразовании с помощью датчиков акустических колебательных смещений упругих волн, распространяющихся в металле, на поверхности технологического оборудования, при истечении жидкости, находящейся под высоким давлением (16 МПа) и при высокой температуре (300–320°С и более), через неплотность, например, в виде трещины, в электрический сигнал, усилении, преобразовании этого сигнала и подаче его на вход вычислительного устройства ПТК САКТ для обработки по специальному алгоритму.

Проведем сравнительный анализ основных технических характеристик и конструктивных особенностей КТС САКТ, представленных в статье [5], и современного КТС САКТ, разработанного специалистами АО «НТЦД». По основным техническим характеристикам датчики акустические GT-400 и датчики акустические (ДА) АО «НТЦД» практически идентичны, а именно, коэффициент акустико-электрического преобразования на резонансной частоте (≈ 100 кГц) в диапазоне рабочих частот от 50 до 250 кГц составляет не менее 45 дБ относительно 1 В/м/с. Однако диапазон измерения среднеквадратического значения (СКЗ) напряжения сигнала от GT-400 модулей усилителей-преобразователей УП-01АЦ блоков БУП-01АЦ – от 1 до 1000 мкВ значительно меньше диапазона измерения СКЗ напряжения сигнала от ДА модулей усилителей-преобразователей УП–АЭ блоков БОС–16А – от 1 мкВ до 3200 мкВ. Учитывая, что величина течи (G_t , л/мин) связана с величиной СКЗ напряжения сигнала от ДА (U , мкВ) эмпирическим соотношением $G_t = 0,0183 U$, современные требования по контролю верхнего значения диапазона измерения расхода течи – не менее 19,0 л/мин [4] – для КТС САКТ, представленного в статье [5], не обеспечиваются, тогда как УП–АЭ блоков БОС–16А обеспечивают контроль расхода течи не менее 58,56 л/мин.

Выше были отмечены достоинства современного исполнения КИА САКТ, но следует отметить еще некоторые отличительные особенности конструктивных и функциональных решений, способствующих повышению достоверности получаемой информации в процессе диагностики (контроле работоспособного состояния) технических средств КИА САКТ. Сущность этих решений заключается в следующем. Диагностика каналов на базе датчиков GT-400, в корпусах каждого из которых встроены пьезокерамические излучатели акустических волн, осуществляется посредством подачи на каждый излучатель последовательности импульсных сигналов от тестового генератора ТГ-01АЦ с параметрами тестового сигнала

(частота $F_{\text{тест зад}} = 11$ кГц; длительность $\tau_{\text{тест зад}} = 5$ мкс; амплитуда $A_{\text{тест зад}} = 2,5$ В) по длинным аналоговым линиям связи – по одному коаксиальному радиочастотному экранированному кабелю на каждый датчик GT-400. Диагностика КИА САКТ осуществляется путем подачи тестовых сигналов с генераторов тестовых ГТ Блока Г с параметрами тестового сигнала (диапазон изменения частоты – от 100 до 120 кГц; период изменения частоты – 100 мс; длительность режима подачи тестового сигнала – 40 с; величина выходного гармонического сигнала, Р-Р – 190 В) по укороченным аналоговым линиям связи на преобразователи акустические ПА (см. рис.1). ПА предназначены для излучения колебательных смещений упругих волн по поверхности трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции, а также теплообменников СПОТ. Таким образом, на базе каналов тестовых сигналов с использованием ПА, укороченных аналоговых линий связи и Блоков Г реализован физический принцип пространственно-временного распространения акустических сигналов по металлу трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции, а также теплообменников СПОТ, РУ ВВЭР – экспоненциальное затухание сигнала по длине трубопроводов и оборудования. Применение каналов тестовых сигналов с использованием ПА позволило многократно сократить количество дорогостоящих коаксиальных радиочастотных экранированных кабелей, применяемых для диагностики акустических каналов на базе датчиков GT-400, а также, что немаловажно, существенно сократить количество «дефицитных» коаксиальных контактных групп гермопроходов.

Однотипность применяемого физического принципа пространственно-временного распространения акустических сигналов по металлу трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции, а также теплообменников СПОТ РУ ВВЭР, идентичность технических характеристик датчиков акустических GT-400 и ДА, расширенный диапазон измерения СКЗ напряжения сигнала от ДА модулей усилителей-преобразователей УП-АЭ блоков БОС-16А, идентичность алгоритмов функционирования акустических систем САКТ говорит о том, что современные акустические системы контроля течи трубопроводов и оборудования РУ ВВЭР полностью соответствуют требованиям концепции ТПР, а именно, чувствительность по расходу течи – не хуже 3,8 л/мин для главных циркуляционных трубопроводов большого диаметра (ГЦТ) и 1,9 л/мин – для остальных трубопроводов; временной интервал обнаружения и измерения параметров течи – не более 1 ч; относительная погрешность измерения расхода течи – не более $\pm 50\%$; погрешность измерения координат местоположения течи – ± 3 м, но не более половины шага расстановки первичных преобразователей.

В качестве примера практической реализации применения каналов тестовых сигналов с использованием ПА для диагностики КИА САКТ рассмотрим схему расположения датчиков акустических и преобразователя акустического на ГЦТ петли 1 энергоблока № 1 Курской АЭС-2, представленной на рис. 2.

Во-первых, следует отметить унификацию в конструктивных решениях самих ДА и ПА, а также узлов крепления (ДКНБ.301532.020-80) ДА и ПА к трубопроводам ГЦТ петли 1.

Экспоненциальное затухание акустического сигнала по длине трубопроводов и оборудования определяется выражением

$$U_1 = U_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot l_1), \quad (1)$$

где U_0 – величина акустического сигнала в месте расположения ПА, мкВ; U_1 – величина акустического сигнала в месте расположения ДА, мкВ; α – декремент затухания (при величине затухания 1 дБ/м $\alpha = 1/8,686$ м⁻¹); l_1 – расстояние от места расположения ПА до ДА, м.

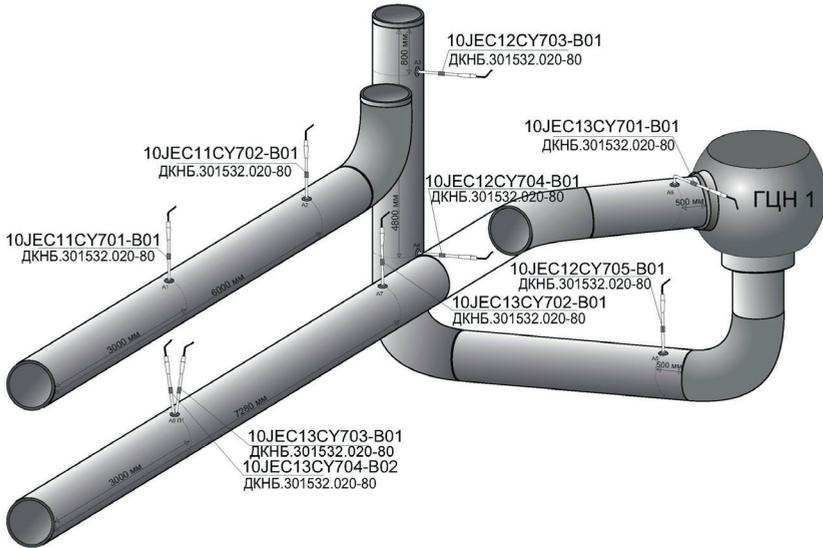


Рис. 2. Схема расположения датчиков акустических и преобразователя акустического на ГЦТ петли 1 энергоблока № 1 Курской АЭС-2

Проведем оценку достаточности использования одного ПА на петлю 1 ГЦТ для контроля работоспособного состояния КИА САКТ. Величина акустического сигнала в месте расположения ПА при подаче тестовых сигналов с генератора тестового ГТ составляет ≈ 2000 мкВ. Поскольку ПА 10JEC13CY704-B02 расположен в одной точке контроля с ДА 10JEC13CY703-B01 (см. рис. 2), следовательно, ДА 10JEC13CY703-B01 зафиксирует величину акустического сигнала $U_0 \approx 2000$ мкВ, что соответствует величине имитируемой течи 36,6 л/мин. Максимальное расстояние от места расположения ПА 10JEC13CY704-B02 до наиболее удаленного ДА 10JEC12CY703-B01 не превышает 20 м, следовательно, ДА 10JEC12CY703-B01 зафиксирует величину акустического сигнала $U_1 \approx 200$ мкВ, т.е. все КИА (8 шт. по петле 1) в процессе контроля работоспособного состояния уверенно диагностируются. Учитывая тот факт, что в режиме штатного функционирования РУ ВВЭР максимальный уровень фоновых шумов не превышает 30–50 мкВ [9], т.е. значение величины полезного сигнала превышает значение величины фоновых шумов более чем в три раза, можно с уверенностью утверждать, что достоверность получаемой информации в процессе диагностики технических средств КИА САКТ обеспечивается на должном уровне. Аналогично осуществляется диагностика КИА САКТ, контролирующих герметичность трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции, а также теплообменников СПОТ, РУ ВВЭР.

На этапе работ перед вводом КТС САКТ (САКТ-2К, СКТТ СПОТ) в эксплуатацию проводится нормирование значений акустических сигналов для всех КИА САКТ (САКТ-2К, СКТТ СПОТ), определяемых выражением (1). В режиме штатного функционирования КТС САКТ (САКТ-2К, СКТТ СПОТ) оценка работоспособного состояния КИА осуществляется путем сравнения измеренных значений акустических сигналов ($U_{i\text{изм}}$, мкВ) с нормированным значением ($U_{i\text{норм}}$, мкВ). Считается, что КИА САКТ (САКТ-2К, СКТТ СПОТ) сохраняет исходные технические характеристики (работоспособное состояние), если выполняется условие

$$|U_{i\text{изм}} - U_{i\text{норм}}| \leq \pm \delta, \quad (2)$$

где δ – статистически значимая величина допустимых пределов погрешности измерения

$U_{i \text{ изм}}$. Величина δ определяется по результатам многократных измерений $U_{i \text{ норм}}$ на этапе ввода КТС САКТ (САКТ-2К, СКТТ СПОТ) в эксплуатацию.

Диагностирование ПТК позволяет обеспечивать контроль технического состояния программной платформы, состояния процессов; состояния сетевых средств; приема (передачи) информации; мониторинг оборудования (температура внутри шкафа, открывание (закрывание) аппаратного шкафа, наличие электропитания).

Реализация указанных выше технических решений в современных акустических системах контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования получила практическое применение на РУ ВВЭР: Балаковская АЭС блоки № 1, 2; Кольская АЭС блоки № 1, 2; Калининская АЭС блоки № 1, 2, 3, 4; Курская АЭС-2 блоки № 1, 2; Нововоронежская АЭС блоки № 4, 5; Ростовская АЭС блоки № 1, 2; АЭС «Аккую» блоки № 1, 2, 3, 4 (Турция); АЭС «Руппур» блоки № 1, 2 (Республика Бангладеш); АЭС «Куданкулам» блоки № 3, 4 (Индия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные акустические системы контроля течи трубопроводов и оборудования РУ ВВЭР выполнены на высоком техническом уровне.

Системы удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к системам контроля течи в рамках концепции «течь перед разрушением» по чувствительности, быстродействию, точности измерения величины и места течи.

Системы удовлетворяют требованиям патентной чистоты при поставках акустических систем контроля течи на отечественные и зарубежные АЭС.

При создании современных акустических систем контроля течи использованы научно-технические решения, позволившие повысить достоверность информации при контроле работоспособного состояния технических средств КИА САКТ, повысить технологичность и снизить трудоемкость выполнения работ по обслуживанию технических средств КИА САКТ, расположенных в гермозоне АЭС в условиях интенсивного ионизирующего излучения.

Литература

1. Киселев В.А., Ривкин Е.Ю. Применение концепции «течь перед разрушением» при анализе безопасности АЭС. // Атомная энергия. – 1993. – Т.75. – Вып. 6. – С. 426–430.
2. НП-001-15 (ОПБ-88/15). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. 2016. Электронный ресурс: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c37/4293756900.pdf> (дата доступа 10.05.2024).
3. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 261 с.
4. ГОСТ Р 58328-2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением». Электронный ресурс: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732619.pdf> (дата доступа 10.05.2024).
5. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Дворников П.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Шутов П.С., Швецов Д.М., Коноплев Н.П. Разработка системы акустического контроля течей. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – Вып. 6. – С. 342–347.
6. Белоглазов А.В., Бударин А.А., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Шутов С.С., Замиусский В.Н., Савинов А.А., Шутов П.С. Патент RU № 2709474 «Система акусти-

ческого контроля течи трубопровода АЭС». Опубликовано 18.12.2019. Электронный ресурс: https://yandex.ru/patents/doc/RU2709474C1_20191218 (дата доступа 10.05.2024).

7. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Шутов С.С., Замуусский В.Н., Савинов А.А., Шутов П.С., Чичков А.Г., Мильшин В.И., Ознобишина М.Д. Патент RU № 2760604 «Канал измерительный акустический». Опубликовано 29.11.2021. Электронный ресурс: <https://patents.google.com/patent/RU2760604C1/ru> (дата доступа 10.05.2024).

8. Белоглазов А.В., Бударин А.А., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Шутов С.С., Замуусский В.Н., Савинов А.А., Шутов П.С. Патент RU № 2722684 «Система контроля течи теплообменника системы пассивного отвода тепла акустическим методом». Опубликовано 03.06.2020. Электронный ресурс: https://yandex.ru/patents/doc/RU2722684C1_20200603 (дата доступа 10.05.2024).

9. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Дворников П.А., Швецов Д.М., Кудряев А.А., Белоусов П.А. Основные источники фоновых акустических шумов ГЦК ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – Вып. 3. – С. 161–167.

Поступила в редакцию 15.05.2024

Авторы

Дворников Павел Александрович, научный руководитель, д.т.н.,

Email: dvornikov@diaprom.ru.

Ковтун Сергей Николаевич, руководитель службы разработки специальных систем диагностики, к.т.н.,

Email: skov@diaprom.ru.

Кудряев Андрей Алексеевич, первый заместитель генерального директора – технический директор,

Email: kudryaev@diaprom.ru.

Молявкин Алексей Николаевич, заместитель технического директора по разработке диагностических систем – начальник отдела диагностики реакторных установок,

Email: molyavkin@diaprom.ru.

Замууский Владимир Николаевич, начальник лаборатории разработки программно-технических средств СКТ, к.т.н.,

Email: zamiusky@diaprom.ru.

Савинов Андрей Адольфович, начальник лаборатории разработки датчиков,

Email: savinov@diaprom.ru.

Бударин Алексей Александрович, начальник отдела технической диагностики реакторных установок различного типа,

Email: budaa@diaprom.ru.

Шутов Сергей Семенович, начальник отдела экспериментальных физических исследований реакторных установок различного типа,

Email: shutovss@diaprom.ru.

Шутов Павел Семенович, заместитель начальника отдела технической диагностики реакторных установок различного типа,

Email: shutovps@diaprom.ru.

Лукьянов Дмитрий Александрович, начальник отдела разработки систем специального назначения, к.т.н.,

Email: dhluk@diaprom.ru.

UDC 621.039.564.5

Experience in Developing Modern Acoustic Systems for Monitoring of Coolant Leaks in the VVER Reactor Pipelines and Equipment

Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Molyavkin A.N., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A., Budarin A.A., Shutov S.S., Shutov P.S., Lukyanov D.A.

JSC «Scientific-technical center «DIAPROM» (JSC «STCD»),
9A-ya Sinichkina St., bld. 3, 111020 Moscow, Russia

Abstract

The paper considers issues concerned with development of modern acoustic systems for monitoring of coolant leaks in the VVER reactor pipelines and equipment as regards the compliance with the current requirements of the “leak before destruction” concept. For the acoustic coolant leak monitoring system, as a system important to the safety of nuclear power plants, in order to comply with current requirements for coolant leak monitoring systems, scientific and technical solutions have been proposed aiming to solve such important issues as extending the dynamic range of monitored coolant leak values, and ensuring the reliability of results from determining the fact that there is a leak, and the accuracy of measuring the coolant leak magnitude and location, as well as issues concerned with improving the feasibility and reducing the complexity of operations to maintain the acoustic measuring channel hardware installed within the NPP containment in conditions of intensive ionizing radiation. Modern acoustic systems for monitoring of coolant leaks in the VVER reactor pipelines and equipment comply with the patent purity requirements for supply of acoustic leak monitoring systems to Russian and foreign NPPs. The structure and the key technical characteristics of the acoustic leak monitoring system’s hardware package have been considered. It has been noted that the proposed acoustic leak monitoring system in the framework of the «leak before destruction» concept meets current requirements for sensitivity, time of response and accuracy of measuring the leakage magnitude and location, and is applicable to the VVER reactor second circuit pipelines and equipment. Current acoustic systems for monitoring coolant leakage in pipelines and equipment have been practically used for specific applications at NPPs with VVER reactor facilities.

Keywords: leak monitoring, pipeline, equipment, acoustic sensor, hardware complex, system, reactor facilities.

For citation: Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Molyavkin A.N., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A., Budarin A.A., Shutov S.S., Shutov P.S., Lukyanov D.A. Experience in Developing Modern Acoustic Systems for Monitoring of Coolant Leaks in the VVER Reactor Pipelines and Equipment. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 69–80. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.06> (in Russian)

References

1. Kiselyov V.A., Rivkin E.Y. Application of the leak-before-break concept in nuclear power plant safety analysis. *Atomic Energy*. 1993, vol. 75, iss. 6, pp. 918–921. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00760572>
2. NP-001-15 (OPB-88/15) *General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants*. 2016. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c37/4293756900.pdf> (accessed May 10, 2024).
3. Hetman A.F. *The safety concept of «leak before destruction» for pressure vessels and pipelines of nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1999, 261 p.
4. GOST R 58328-2018. *Pipelines of nuclear power plants. The concept of «flowing before destruction»*. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732619.pdf> (accessed May 10, 2024).

5. Morozov S.A., Kovtun S.N., Budarin A.A., Dvornikov P.A., Kudryaev A.A., Kondratovich F.V., Shutov P.S., Shvetsov D.M., Konoplev N.P. Development of an acoustic leak monitoring system. *Atomic Energy*. 2007, vol. 103, iss. 6, pp. 925–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-007-0149-1>
6. Beloglazov A.V., Budarin A.A., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Molyavkin A.N., Shutov S.S., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A., Shutov P.S. *Patent RU № 2709474. System of acoustic leak monitoring of NPP pipeline*. Published on 18.12.2019. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2709474C1_20191218 (accessed May 10, 2024).
7. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Budarin A.A., Molyavkin A.N., Shutov P.S., Shutov S.S., Chichkov A.G., Milshin V.I., Oznobishina M.D., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A. *Patent RU № 2760604. Acoustic measuring channel*. Published on 29.11.2021. Available at: <https://patents.google.com/patent/RU2760604C1/ru> (accessed May 10, 2024).
8. Beloglazov A.V., Budarin A.A., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Kudryaev A.A., Molyavkin A.N., Shutov S.S., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A., Shutov P.S. *Patent RU № 2722684. Monitoring system for leakage of heat exchanger of passive heat removal system by acoustic method*. Published on 03.06.2020. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2722684C1_20200603 (accessed May 10, 2024).
9. Morozov S.A., Kovtun S.N., Budarin A.A., Dvornikov P.A., Shvetsov D.M., Kudryaev A.A., Belousov P.A. Main sources of background acoustic noise of the main circulation loop in VVER-1000 reactors. *Atomic Energy*. 2007, vol. 103, iss. 3, pp. 681–688. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-007-0109-9>

Authors

Pavel A. Dvornikov, Research supervisor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: dvornikov@diaprom.ru

Sergey N. Kovtun, Head of the service for the development of special diagnostic systems, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: skov@diaprom.ru

Andrey A. Kudryaev, First deputy general director-technical director,

E-mail: kudryaev@diaprom.ru

Aleksej N. Molyavkin, Deputy technical director for the development of diagnostic systems – head of the department of diagnostics of reactor installations,

E-mail: molyavkin@diaprom.ru

Vladimir N. Zamiusskiy, Head of the laboratory for the development of software and hardware for LMS, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: zamiussky@diaprom.ru

Andrey A. Savinov, Head of the sensor development laboratory,

E-mail: savinov@diaprom.ru

Alexei A. Budarin, Head of the department of technical diagnostics of reactor installations of various types,

E-mail: budaa@diaprom.ru

Sergey S. Shutov, Head of the department of experimental physical research of reactor installations of various types,

E-mail: shutovss@diaprom.ru

Pavel S. Shutov, Deputy Head of the department of technical diagnostics of reactor installations of various types,

E-mail: shutovps@diaprom.ru

Dmitry A. Lukyanov, Head of the special purpose systems development department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: dhluk@diaprom.ru