

УДК 621.039.564.5

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.05>*Оригинальная статья / Original paper*

Опыт разработки современных систем влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР

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

Акционерное общество «Научно-технический центр «Дианпром» (АО «НТЦД»), 111020, г. Москва, ул. 2-я Синичкина, д. 9А, стр. 3, помещ. 4/2

Реферат. Рассмотрены вопросы разработки современных систем влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР в части удовлетворения современным требованиям концепции «течь перед разрушением». Для системы влажностного контроля течи теплоносителя как системы, важной для безопасности АЭС, в целях удовлетворения современным требованиям к системам контроля течи теплоносителя предложены научно-технические решения, направленные на решение таких важных вопросов, как повышение чувствительности контролируемых величин течей теплоносителя, достоверности результатов установления факта течи и определения величины и места течи теплоносителя, повышения технологичности и снижения трудоемкости выполнения работ по обслуживанию технических средств каналов измерительных влажностных, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения. Современные системы влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР удовлетворяют требованиям патентной чистоты при поставках систем влажностного контроля течи на отечественные и зарубежные АЭС. Рассмотрены структура построения и основные технические характеристики комплекса технических средств системы влажностного контроля течи. Отмечено, что предложенная система влажностного контроля течи в рамках концепции «течь перед разрушением» удовлетворяет современным требованиям по чувствительности, быстродействию, точности измерения величины и места течи и применима для трубопроводов и оборудования второго контура реакторных установок ВВЭР. Современные системы влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования получили практическое применение на АЭС с реакторными установками ВВЭР.

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

© 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., 2025

Для цитирования: 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. Опыт разработки современных систем влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:65–80. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.05>

Введение

В атомной энергетике в настоящее время особое внимание уделяется безопасной эксплуатации АЭС. Одной из важнейших задач по обеспечению безопасной эксплуатации реакторных установок (РУ) ВВЭР является оснащение АЭС диагностическими автоматизированными системами контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования [1, 2].

В основе разработки современных систем контроля течи теплоносителя контуров циркуляции лежит концепция «течь перед разрушением» (ТПР). Применение систем контроля течи теплоносителя позволяет своевременно обнаружить течь и безопасно остановить реактор. Поэтому выявление аномалии (течи теплоносителя) в работе реакторной установки на ранней стадии возникновения является весьма актуальной задачей [1–4].

Концепция ТПР для повышения надежности обнаружения течи теплоносителя предусматривает применение не менее трех взаимодополняющих методов обнаружения течи, а на базе их создание систем контроля течи (СКТ), работающих на различных физических принципах. Одним из наиболее изученных и отработанных методов является влажностный метод.

Статья [5] посвящена созданию первой отечественной многоканальной автоматизированной влажностной системы диагностики течей трубопроводов главного циркуляционного контура реакторных установок ВВЭР-1000. В ней описывается назначение системы, объект диагностирования, представлен комплекс технических средств (КТС) СКТВ, принцип и алгоритм функционирования системы, выполнение в автоматическом круглосуточном режиме работы информационных и вспомогательных функций, рассмотрены вопросы создания программного обеспечения, представлены результаты испытаний представительской части СКТВ на стенде течи в ОКБ «Гидропресс». В настоящее время к системам контроля течей теплоносителя как системам, важным для безопасности АЭС, введены новые требования [4], направленные на обеспечение следующих значений характеристик СКТ на номинальной мощности РУ: чувствительность по расходу течи не хуже 1,9 л/мин (114 л/ч) для трубопроводов ДУ от 150 до 750 мм; 3,8 л/мин (228 л/ч) для трубопроводов ДУ от 750 мм и более; верхний диапазон измерения расхода течи не менее 19,0 л/мин; временной интервал обнаружения течи и измерения параметров (величины и места) течи не более одного часа; относительная погрешность измерения расхода течи не более $\pm 50\%$; погрешность измерения координат местоположения течи ± 3 м, но не более половины шага расстановки первичных преобразователей. Для выполнения указанных требований с учетом функционирования КТС СКТВ в условиях внешних воздействующих факторов (ВВФ), характерных для АЭС (сейсмических, механических, климатических, радиационных, электромагнитных, коррозионных и других), требуется решение таких важных задач, как повышение чувствительности контролируемых величин течей теплоноси-

теля, повышение достоверности (информативности) результатов установления факта течи и определения параметров (величины и места) течи теплоносителя, а также задач повышения технологичности и снижения трудоемкости выполнения работ по обслуживанию технических средств каналов измерительных влажностных (КИВ) СКТВ, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения.

Особенности построения КТС СКТВ

Для реализации отмеченных выше задач специалистами Акционерного общества «Научно-технический центр «Диапром» (АО «НТЦД») предложен ряд научно-технических решений, направленных на повышение чувствительности контролируемых величин течей теплоносителя, и получены патенты на изобретения под названиями «Канал измерительный влажностный» [6], «Система влажностного контроля течи трубопровода АЭС» [7], «Система контроля течи теплообменника системы пассивного отвода тепла влажностным методом» [8], «Система контроля течи оборудования второго контура в помещениях водо-водяного энергетического реактора» [9]. Суть этих решений состоит в следующем. Влажностной системой применяется устройство отбора и транспортировки воздуха из контролируемого объема, образованного зазором по всей длине трубопровода между трубопроводом и внутренним кожухом теплоизоляции блочного типа. Увеличение чувствительности оценивается по соотношению толщины традиционной теплоизоляции матового типа (≈ 200 мм) к величине зазора, образующего контролируемый объем трубопровода с блочной конструкцией теплоизоляции (от 5 до 35 мм) и составляет примерно от 8 до 40 раз [7]. С другой стороны, изменена структура построения КТС СКТВ, представленной в [5], в которой сигналы от первичных преобразователей – датчиков влажности (СКТВ-ЗВ) по длинным аналоговым линиям связи поступают на усилительно-преобразовательные модули, размещаемые в программно-техническом комплексе (ПТК), на структуру, в которой усилительно-преобразовательные модули объединены в единый самостоятельный конструктив – блок обработки сигналов (БОС) или измерительное устройство (ИУ) [6, 8, 9], обладающие свойством автономности, что позволяет разместить БОС или ИУ в непосредственной близости к гермопроходке вне гермозоны РУ ВВЭР, что уменьшает длину аналоговых линий связи от датчиков влажности до усилительно-преобразовательных модулей БОС или ИУ и за счет этого уменьшается ослабление сигналов в аналоговых линиях связи, передаваемых от датчиков влажности на БОС или ИУ. Наличие цифровой линии связи, в которой не происходит ослабление сигналов, позволяет передать сигналы с выхода блока обработки сигналов на вход вычислительного устройства ПТК СКТВ для реализации алгоритма работы системы в неискаженном виде. Такая организация структуры предложенной системы и их связей между собой увеличивает чувствительность системы к обнаружению малых течей (≤ 1 л/мин) и этим расширяет динамический диапазон контролируемых величин течей теплоносителя. Кроме того укороченные аналоговые линии связи позволяют значительно повысить технологичность прокладки аналоговых линий связи, а также значительно снизить количество дорогостоящей кабельной продукции для изготовления аналоговых линий связи, число которых доходит до 50-ти штук и более на один энергоблок, а с учетом систем влажностного контроля течи теплоносителя второго контура (СКТВ-2К), влажностного

контроля течи в помещениях герметичного объема (СКТВ-2П) и системы контроля течи теплообменников системы пассивного отвода тепла (СКТТ СПОТ) влажностным методом количество линий связи доходит до 180-ти штук и более. Следует отметить, что предложенные решения в системе влажностного контроля течи трубопровода АЭС применимы и вне гермооболочки АЭС – для трубопроводов и оборудования второго контура РУ ВВЭР, включая теплообменники системы пассивного отвода тепла.

Конструктивные решения предложенного устройства отбора и транспортировки воздуха из контролируемого объема, образованного зазором по всей длине трубопровода между трубопроводом и внутренним кожухом теплоизоляции блочного типа [7], обеспечивают повышение технологичности, снижение трудоемкости выполнения работ по техническому обслуживанию технических средств КИВ СКТВ, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения за счет использования в конструкции разъемных соединителей, применения быстросъемной конструкции крепления датчиков влажности на трубопроводах РУ ВВЭР; тем самым снижаются дозовые нагрузки и повышается безопасность выполнения операций оперативным персоналом по обслуживанию канала измерительного влажностного за счет возможности быстрого соединения (разъединения) элементов, быстрого их монтажа (демонтажа), быстрой их замены в случае необходимости.

Технические решения по обеспечению достоверности результатов получаемой информации от КИВ СКТВ (измеренных значений емкости и сопротивления сенсоров влажности и температуры датчиков влажности (зондов выносных ЗВ), преобразованных измеренных значений емкости и сопротивления в значения относительной влажности и температуры), а в дальнейшем на основании достоверной информации определения по алгоритму функционирования СКТВ факта течи и определения параметров (величины и места) течи теплоносителя, представлены в [6].

Сущность технических решений, направленных на обеспечение достоверности получаемой информации, заключается в контроле работоспособного состояния технических средств КИВ СКТВ. Для этих целей специалистами АО «НТЦД» разработаны технические решения, обеспечивающие проверку сохранности (несохранности) в допустимых пределах технических характеристик КИВ (зондов выносных, аналоговых линий связи, усилительно-преобразовательных модулей БОС или ИУ) с помощью устройств контроля работоспособности и поддержания работоспособности КИВ, построенных на базе электрического нагревателя, а также проработаны технические решения по контролю работоспособного состояния ПТК. Особенность применения устройств контроля работоспособности и поддержания работоспособности заключается в том, что наряду с решением основной задачи по обеспечению проверки технических характеристик КИВ решены вопросы информативности результатов измерений относительной влажности воздуха, значения которых близки к верхним значениям регистрируемого диапазона относительной влажности воздуха – свыше 98%.

Техническая реализация и основные технические характеристики КТС СКТВ в условиях современных требований концепции ТПР

Принципы построения КТС систем контроля течи теплоносителя (СКТ) влажностным методом (подсистемы контроля влажности (ПКВ), системы влажностного контроля течи

теплоносителя первого контура (СКТВ), системы обнаружения течи теплоносителя второго контура (СОТТ-2) и входящие в ее состав системы влажностного контроля течи теплоносителя второго контура (СКТВ-2К), системы влажностного контроля течи в помещениях герметичного объема (СКТВ-2П) и системы контроля течи теплообменников системы пассивного отвода тепла (СКТТ СПОТ) влажностным методом) практически идентичны, поэтому рассмотрим структуру построения КТС на примере системы влажностного контроля течи теплоносителя первого контура (СКТВ) энергоблока № 1 Курской АЭС-2.

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

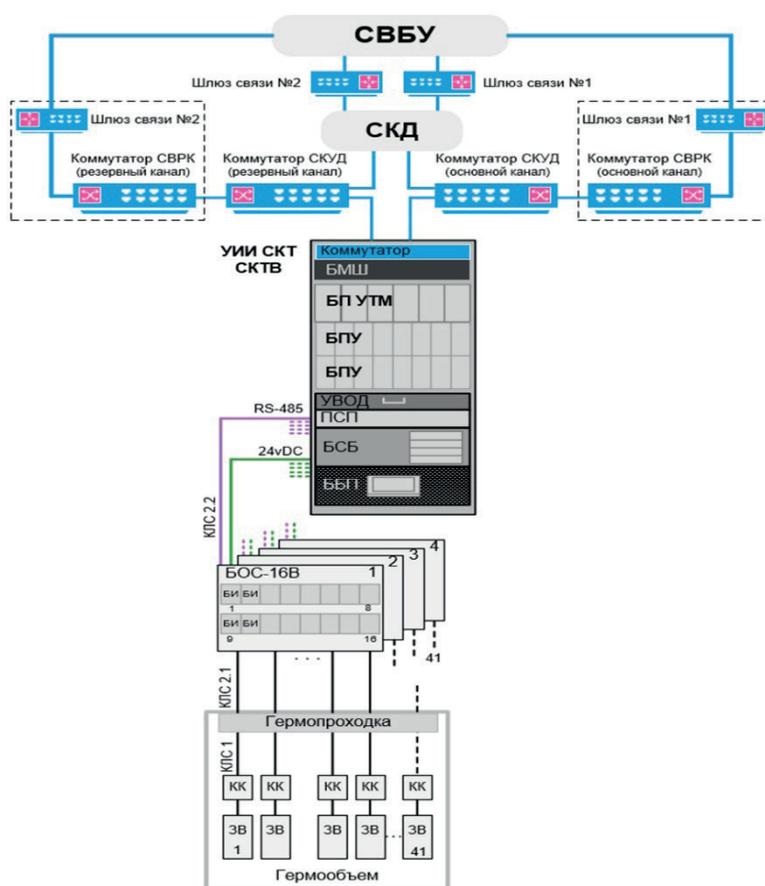


Рис. 1. Структурная схема КТС СКТВ энергоблока № 1 Курской АЭС-2

В состав КТС СКТВ входят датчики влажности – зонды выносные (ЗВ) – 41 шт.; аналоговые кабельные линии связи (КЛС 1, КЛС 2.1), включающие в себя коробки коммутационные (КК) – 41 шт., а также соответствующие контактные группы гермопроходов; блоки обработки сигналов (БОС–16В) – 4 шт., каждый из которых включает в себя усилительно-преобразовательные модули (блоки измерительные (БИ) – 16 шт.; цифровые кабельные линии связи RS 485 (КЛС 2.2); программно-технический комплекс (ПТК) на базе устройства информационно-измерительного (УИИ СКТ) – 1 шт.

СКТВ обеспечивает обнаружение течи теплоносителя следующего оборудования и трубопроводов энергоблока № 1 Курской АЭС-2 (РУ ВВЭР-ТОИ): трубопроводы ГЦТ; трубопровод соединительный системы компенсации давления.

В статье [5] достаточно подробно описаны принцип действия и алгоритм функционирования системы СКТВ, поэтому следует отметить отличительные особенности технической реализации отдельных элементов и системы в целом с учетом технических решений, отмеченных в патентах на изобретения [6–9].

В основу алгоритма установления факта течи, величины и местоположения течи СКТВ заложена модель, согласно которой при возникновении течи перегретый пар распространяется в обе стороны от места течи по всей длине трубопровода в зазоре (подызоляционном пространстве), образованном между трубопроводом и внутренним кожухом теплоизоляции блочного типа. В качестве диагностического параметра алгоритма контроля течи используется абсолютная влажность (ρ , кг/м³). Этот параметр определяется через измеряемую относительную влажность (φ , %) и температуру воздуха (T , °С).

Для системы влажностного контроля течи диагностическим признаком течи водяного теплоносителя является повышение абсолютной влажности воздуха в зазоре теплоизоляции трубопровода. Система постоянно измеряет относительную влажность (φ , %) и температуру (T , °С) воздуха в вытяжном патрубке ЗВ и на основании полученной информации с учетом значения удельного объема перегретого пара при температуре подызоляционного пространства и атмосферном давлении ($v \approx 2,6402$ м³/кг) вычисляет значение абсолютной влажности воздуха $\rho = f(\varphi, T, v)$. При достижении парогазовым фронтом (ПГФ) мест установки ЗВ часть парогазовой смеси будет проходить по вытяжным патрубкам через чувствительные элементы ЗВ, что приведет к росту их показаний. Поскольку датчики находятся на различных расстояниях от места течи, то моменты увеличения показаний соответствующих каналов будут различными и зависят от скорости распространения ПГФ, т.е. от величины течи. Факт течи, зарегистрированный системой, подтверждается в случае, когда фиксируется течь на участке тремя датчиками. Моменты достижения уставок по росту показаний трех ближайших датчиков фиксируются и используются для определения величины и места течи по специальному алгоритму в вычислительном устройстве ПТК СКТВ. Таким образом, реализован физический принцип пространственно-временного распространения ПГФ (время-пролетная модель) в показаниях системы, проявляющиеся в форме возникающих с временным сдвигом возрастаний показаний разнесенных по трубопроводу зондов выносных.

Сравнительный анализ принципа функционирования датчиков влажности и основных технических характеристик КТС СКТВ, представленных в статье [5] и современного КТС СКТВ, разработанного специалистами АО «НТЦД», показал, что по принципу функционирования датчики влажности СКТВ-ЗВ и зонды выносные (ЗВ) аналогичны: тип сенсора влажности – сорбционно-емкостной; тип сенсора температуры – платиновый термопреобразователь сопротивления. Однако, по основным техническим характеристикам зонды выносные (ЗВ) АО «НТЦД» в составе КИВ СКТВ имеют отличия перед КИВ СКТВ с датчиками влажности СКТВ-ЗВ. Если в КИВ СКТВ АО «НТЦД» диапазон измерения относительной влажности от 0 до 100%; диапазон измерения температуры от 0 до +125°С; предел допускаемой абсолютной погрешности измерения относительной влажности в диапазоне относительной влажности от 0 до 50% – не более

$\pm 5\%$; в диапазоне относительной влажности от 50 до 100% – не более $\pm 7\%$; предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры в диапазоне от 0 до $+125^\circ\text{C}$ – не более $\pm 2^\circ\text{C}$, то в КИВ СКТВ, представленном в статье [5], диапазон измерения относительной влажности от 5 до 95%; диапазон измерения температуры от 15 до $+100^\circ\text{C}$; предел допускаемой абсолютной погрешности измерения относительной влажности в диапазоне относительной влажности от 5 до 15% – не более $\pm 8\%$; от 15 до 85% – не более $\pm 7\%$; в диапазоне относительной влажности от 85 до 95% – не более $\pm 10\%$; предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры в диапазоне от 15 до $+100^\circ\text{C}$ – не более $\pm 3^\circ\text{C}$. Таким образом, современный КТС СКТВ имеет явные преимущества как по динамическому диапазону измеряемых основных параметров, так и по точностным характеристикам.

Выше были отмечены достоинства современного исполнения КИВ СКТВ, но следует отметить еще некоторые отличительные особенности конструктивных и функциональных решений, способствующих повышению достоверности получаемой информации в процессе диагностики (контроле работоспособного состояния) технических средств КИВ СКТВ. Диагностика каналов на базе датчиков влажности СКТВ-ЗВ [5], в корпусах каждого из которых встроены емкостной сенсор влажности и резистивный сенсор температуры, эталонный конденсатор и эталонный резистор, а также микрореле, осуществляется посредством подачи на каждый датчик сигнала от коммутатора К-01ВЦ, управляемого сигналами ПТК СКТВ, на периодическое автоматическое подключение ко входам усилителей-преобразователей УП-01ВЦ эталонных конденсаторов и резисторов с помощью микрореле. Недостатком такого метода диагностики КИВ является тот факт, что в период контроля работоспособного состояния КИВ от эталонных конденсаторов и резисторов, фактически, осуществляется контроль работоспособного состояния КЛС и усилительно-преобразовательных модулей блоков УП-01ВЦ, а проверки работоспособности самих емкостных сенсоров влажности и резистивных сенсоров температуры не проводится. Технические решения, направленные на устранение указанного недостатка с применением устройств контроля работоспособности и поддержания работоспособности КИВ, построенных на базе электрического нагревателя, представлены в [6]. Сущность решений поясняет рис. 2, на котором изображена структурная схема канала измерительного влажностного КИВ СКТВ. Датчик влажности воздуха 1, как и датчик влажности СКТВ-ЗВ, включает в себя емкостной сенсор влажности воздуха 4, эталонный конденсатор 5, резистивный сенсор температуры воздуха 6, эталонный прецизионный высокоточный резистор 7, высокоточный низкоомный прецизионный резистор 8, реле 9, но дополнительно введен электрический нагреватель 10. Электрический нагреватель 10 имеет плоскую форму и выполнен из провода, имеющего большое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления. Электрический нагреватель 10 размещен между емкостным сенсором влажности 4 и резистивным сенсором температуры 6 с возможностью теплового контакта с ними.

Устройство контроля работоспособности КИВ работает следующим образом. Программно-управляемый регистратор 18 (промышленный компьютер) подает на программно-управляемый модуль включения (отключения) питания 21 команду на подключение линии питания 29 электрического нагревателя 10 и реле 9 к источнику питания 19; при этом контактные группы реле 9 отключают емкостной сенсор влажности 4 и резистивный сенсор температуры 6 от входных цепей измерения емкости емкостного сенсора влажности 4 и сопротивления резистивного сенсора

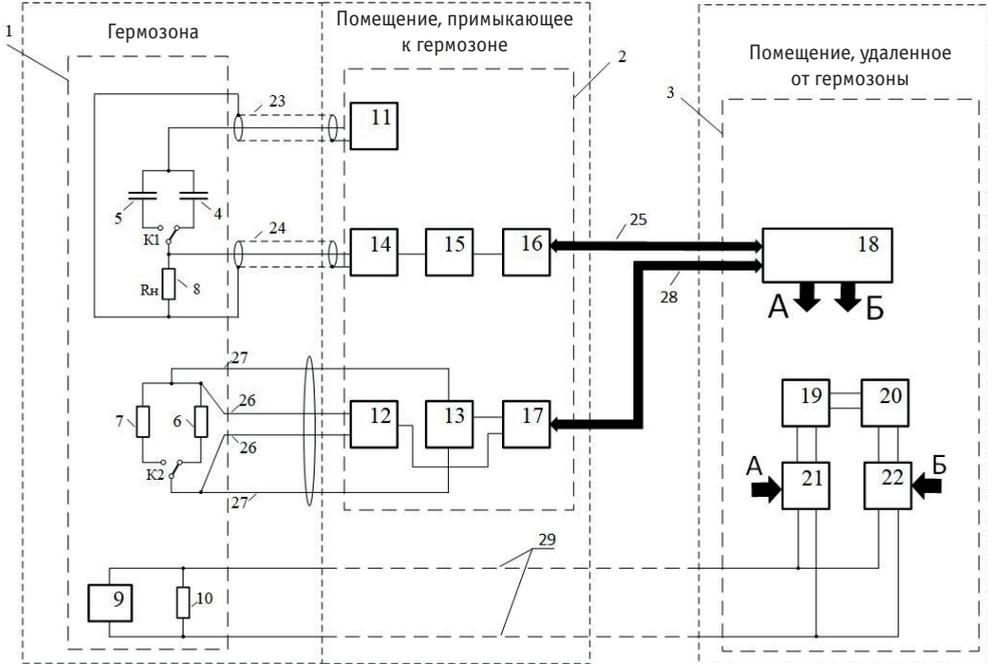


Рис. 2. Структурная схема канала измерительного влажностного КИВ СКТВ

температуры 6, и подключают вместо них, соответственно, эталонный конденсатор 5 и эталонный резистор 7. С момента переключения сенсоров 4 и 6 на эталоны 5 и 7 электрический нагреватель 10, выделяя тепловую энергию, повышает температуру емкостного сенсора 4 влажности и резистивного сенсора 6 температуры; при этом емкость емкостного сенсора 4 влажности уменьшается, а сопротивление резистивного сенсора 6 увеличивается. Продолжительность нагрева сенсоров 4 и 6 определяется величиной подогрева сенсоров примерно на 10–20°C. По истечении времени нагрева на программно-управляемый модуль включения (отключения) питания 21 от программно-управляемого регистратора 18 подается команда на отключение линии питания 29 от источника питания 19 и на запуск программы обработки полученных данных.

Считается, что емкостной сенсор влажности 4 и резистивный сенсор температуры 6 сохранили работоспособность, если статистически обосновано выполнение условий

$$C_0 > C_1 \text{ и } R_0 < R_1,$$

$$-\delta_1 \leq (C_0 - C_1) \leq +\delta_1;$$

$$-\delta_2 \leq (R_1 - R_0) \leq +\delta_2,$$

где C_0, C_1 – значения емкостей емкостного сенсора влажности 4, измеренные, соответственно, на момент включения и отключения электрического нагревателя 10; R_0, R_1 – значения сопротивлений резистивного сенсора температуры 6, измеренные, соответственно, на момент включения и отключения электрического нагревателя 10; δ_1 – статистически значимая величина погрешности измерения $(C_0 - C_1)$; δ_2 – статистически значимая величина погрешности измерения $(R_1 - R_0)$.

Считается, что канал с отключенным емкостным сенсором влажности 4 и резистивным сенсором температуры 6 сохранил исходные точностные характеристики, если выполнены условия

$$(C_{\text{ЭТ ИЗМ}} - \delta_3) \leq C_{\text{ЭТ}} \leq (C_{\text{ЭТ ИЗМ}} + \delta_3);$$

$$(R_{\text{ЭТ ИЗМ}} - \delta_4) \leq R_{\text{ЭТ}} \leq (R_{\text{ЭТ ИЗМ}} + \delta_4),$$

где $C_{\text{ЭТ}}$ – величина емкости эталонного конденсатора 5; $C_{\text{ЭТ ИЗМ}}$ – измеренное значение емкости эталонного конденсатора 5; $R_{\text{ЭТ}}$ – величина сопротивления эталонного резистора 7; $R_{\text{ЭТ ИЗМ}}$ – измеренное значение сопротивления эталонного резистора 7; δ_3 – статистически значимая величина погрешности измерения $C_{\text{ЭТ ИЗМ}}$; δ_4 – статистически значимая величина погрешности измерения $R_{\text{ЭТ ИЗМ}}$.

Величины $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ определяются по результатам многократных измерений, проведенных в процессе испытаний канала измерительного или на начальной стадии его эксплуатации.

Устройство поддержания работоспособности КИВ работает следующим образом. При измерении высоких значений относительной влажности воздуха (свыше 98%) емкостной сенсор влажности 4 теряет способность поставлять достоверную информацию о его емкости. Для преодоления этого эффекта программно-управляемый регистратор 18 (промышленный компьютер) анализирует регистрируемую относительную влажность воздуха при величине относительной влажности воздуха 98% и подает на программно-управляемый модуль 22 команду подключения линии питания 29 к источнику питания 19 через ограничительный модуль 20, который предназначен для снижения напряжения подаваемого на электрический нагреватель 10 и реле 9. Величина подаваемого напряжения на реле 9 должна быть гарантировано ниже величины порога срабатывания реле 9, в то же время должна обеспечить стационарный подогрев сенсоров 4 и 6 электрическим нагревателем 10 примерно на 3–5°C. Повышение температуры сенсоров 4 и 6 позволяет измерить емкость емкостного сенсора влажности 4 и сопротивления резистивного сенсора температуры 6 и по их новым значениям рассчитать реальную относительную влажность воздуха выше 98%.

Значения емкости емкостного сенсора влажности 4 (C) и сопротивления резистивного сенсора температуры 6 (R) при относительной влажности воздуха выше 98% определяются выражениями

$$C = C_{\text{О ИЗМ}} + |\Delta C|;$$

$$R = R_{\text{О ИЗМ}} + \Delta R,$$

где $C_{\text{О ИЗМ}}$ – значение емкости емкостного сенсора влажности 4, измеренное до включения электрического нагревателя 10, при $\varphi \approx 98\%$; ΔC – значение изменения емкости сенсора влажности 4 при достижении стационарной температуры подогрева; $R_{\text{О ИЗМ}}$ – значение сопротивления резистивного сенсора температуры 6, измеренное до включения электрического нагревателя 10, при $\varphi \approx 98\%$; ΔR – значение изменения сопротивления резистивного сенсора температуры 6 при достижении стационарной температуры подогрева.

Значения величин $C_{\text{О ИЗМ}}$, ΔC , $R_{\text{О ИЗМ}}$ и ΔR определяются по результатам многократных измерений, проведенных при испытаниях КИВ СКТВ или на начальной стадии его эксплуатации.

Таким образом, реализация технических решений, представленных в [6–9], позволяет повысить достоверность и точность измерения параметров контролируемой воздушной среды за счет сокращения (в разы) длин аналоговых линий связи, являющихся источниками искажения передаваемых по ним сигналов датчиков влажности, использования информационных цифровых линий связи, которые передают информацию без искажения и не вносят вклад в погрешность результатов измерения параметров контролируемой воздушной среды, контроля стабильности технических характеристик КИВ, исключающего эксплуатацию канала при наличии отклонений точностных характеристик от допустимых пределов, увеличения информативности определения значений относительной влажности воздуха, близких к верхним значениям регистрируемого диапазона относительной влажности воздуха – от 98 до 100%, а также обеспечивает повышение технологичности, снижение трудоемкости выполнения работ по техническому обслуживанию технических средств КИВ СКТВ, расположенных в гермозоне АЭС, в условиях интенсивного ионизирующего излучения.

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).

Однотипность применяемого физического принципа пространственно-временного распространения парогазового фронта (время-пролетная модель) в подызоляционном пространстве трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции, улучшенные технические характеристики датчиков влажности ЗВ, расширенный диапазон измерения относительной влажности и температуры блоками измерительными БИ блоков БОС–16В, идентичность алгоритмов функционирования систем СКТВ, результаты испытаний представительской части СКТВ на стенде течи в ОКБ «Гидропресс» свидетельствуют о том, что современные системы влажностного контроля течи трубопроводов и оборудования РУ ВВЭР полностью соответствуют требованиям концепции ТПР, отмеченным выше, по чувствительности к расходу течи, временному интервалу обнаружения течи, точностным характеристикам измерения параметров (величины и места) течи.

В качестве примера практической реализации КТС СКТВ и оценки возможности с его помощью осуществлять контроль верхнего значения диапазона измерения расхода течи (не менее 19,0 л/мин) рассмотрим схему расположения зондов выносных на ГЦТ петли 1 энергоблока № 1 Курской АЭС-2, представленную на рис. 3.

Во-первых, следует отметить, что на каждом участке трубопроводов петли 1 расположены по три зонда выносных, необходимых для реализации время-пролетной модели распространения ПГФ в подызоляционном пространстве трубопроводов и оборудования 1 и 2 контуров циркуляции.

Проведем оценку возможности измерения значения расхода течи не менее 19,0 л/мин. Величина расхода течи (G_T , л/мин) определяется выражением [5]

$$G_T = (2\pi \cdot D \cdot l \cdot W) / v, \quad (1)$$

где D – внешний диаметр трубопровода, $D=1,0$ м; l – зазор между трубопроводом и теплоизоляцией, $l=(0,005–0,035)$ м; W – средняя скорость ПГФ, м/с; v – удельный объем перегретого пара при температуре подызоляционного пространства и атмосферном давлении, $v = 2,6402$ м³/кг.

Опыт разработки современных систем влажностного контроля течи теплоносителя трубопроводов и оборудования реакторных установок ВВЭР

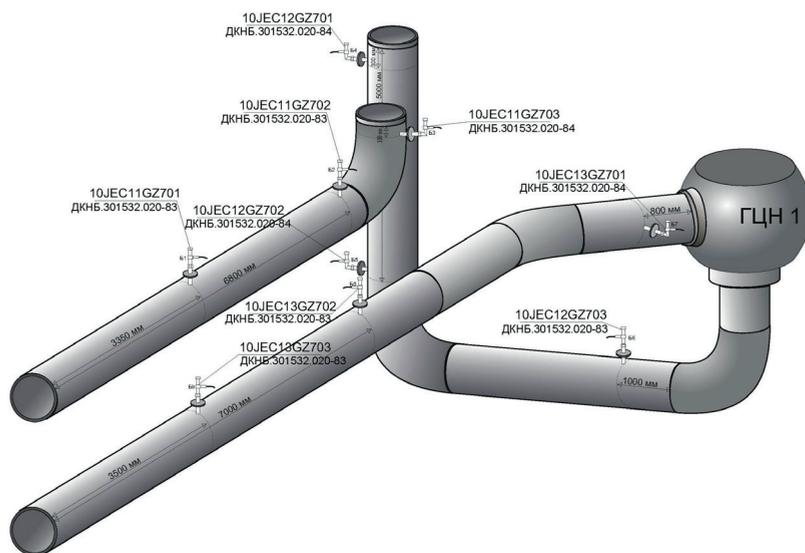


Рис. 3. Схема расположения зондов выносных на ГЦТ петли 1 энергоблока № 1 Курской АЭС-2

По приведенным данным для $G_t = 19,0$ л/мин величина средней скорости ПГФ W находится в пределах $0,063 - 0,443$ м/с. При размещении зондов выносных друг от друга на расстояние $\approx 3,5$ м (см. рис. 3) время распространения ПГФ t находится в пределах $8 - 55$ с. Таким образом, используя современную систему сбора и обработки информации (промышленный компьютер) в составе УИИ СКТ СКТВ, осуществляя опрос КИВ с частотой 1 Гц (1 раз в секунду), система СКТВ уверенно зафиксирует расход течи 19,0 л/мин и более.

На этапе работ перед вводом КТС СКТВ (СКТВ-2К, СКТВ-2П, СКТТ СПОТ влажностным методом) в эксплуатацию проводится нормирование значений порогов абсолютной влажности для всех КИВ СКТВ (СКТВ-2К, СКТВ-2П, СКТТ СПОТ влажностным методом), по достижению которых будет фиксироваться факт течи. Выбор величины порога производится на этапе наладки системы в зависимости от фоновой составляющей абсолютной влажности для конкретной АЭС. Низкое (близкое к фоновому) значение порога повышает оперативность контроля и вероятность обнаружения течи и становится возможным контролировать меньшие величины течей, но при этом повышается вероятность ложного срабатывания. Завышенное значение уставок в свою очередь снижает вероятность ложной тревоги, однако при этом повышается вероятность того, что малая течь может оказаться незафиксированной и увеличивается время фиксации факта течи. Таким образом, существуют некие оптимальные уровни порогов срабатывания, которые определяются как свойствами СКТВ, так и предъявляемыми к системе требованиями концепции ТПР.

Реализация указанных выше технических решений в современных системах влажностного 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 системы влажностного контроля течи трубопроводов и оборудования РУ ВВЭР выполнены на высоком техническом уровне.

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

Удовлетворяют требованиям патентной чистоты при поставках систем влажностного контроля течи на отечественные и зарубежные АЭС.

При создании современных систем влажностного контроля течи использованы научно-технические решения, позволившие повысить достоверность информации при контроле работоспособного состояния технических средств КИВ СКТВ, повысить технологичность и снизить трудоемкость выполнения работ по обслуживанию технических средств КИВ СКТВ, 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;75(6):426–430.
2. НП-001-15 (ОПБ-88/15). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, 2016. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c37/4293756900.pdf> (дата обращения 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». URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293732/4293732619.pdf> (дата обращения 10.05.2024).
5. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Бударин А.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Полионов В.П., Портяной А.Г., Коноплев Н.И. Разработка системы влажностного контроля течи водяного теплоносителя (СКТВ). *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2008;2:30–35. URL: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2008/02.pdf> (дата обращения 10.05.2024).
6. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Кудряев А.А., Молявкин А.Н., Шутов С.С., Замиусский В.Н., Савинов А.А., Шутов П.С., Чичков А.Г., Мильшин В.И., Ознобишина М.Д. Канал измерительный влажностный. Патент на изобретение № 2756850. Опубликовано 06.10.2021. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2756850C1_20211006 (дата обращения 10.05.2024).
7. 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. Система влажностного контроля течи трубопровода АЭС. Патент на изобретение № 2716281. Опубликовано 11.03.2020. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2716281C1_20200311 (дата обращения 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., Замиусский В.Н., Савинов А.А., Шутов П.С. Система контроля течи теплообменника системы пассивного отвода тепла влажностным методом. Патент на изобретение № 2713918. Опубликовано 11.02.2020. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2713918C1_20200211 (дата обращения 10.05.2024).

9. 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. Система контроля течи оборудования второго контура в помещениях водо-водяного энергетического реактора. Патент на изобретение № 2753422. Опубликовано 16.08.2021. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2753422C1_20210816 (дата обращения 10.05.2024).

Поступила в редакцию 17.09.2024

После доработки 12.01.2025

Принята к опубликованию 31.01.2025

Авторы

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

E-mail: dvornikov@diaprom.ru.

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

E-mail: skov@diaprom.ru.

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

E-mail: kudryaev@diaprom.ru.

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

E-mail: molyavkin@diaprom.ru.

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

E-mail: zamiusky@diaprom.ru.

Савинов Андрей Адольфович, начальник лаборатории разработки датчиков,

E-mail: savinov@diaprom.ru.

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

E-mail: budaa@diaprom.ru.

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

E-mail: shutovss@diaprom.ru.

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

E-mail: shutovps@diaprom.ru.

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

E-mail: dluk@diaprom.ru

UDC 621.039.564.5

Experience in the Development of Modern Systems for Humidity Monitoring of Coolant Leaks in Pipelines and Equipment of VVER Reactor Facilities

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 and Technical Center "DIAPROM" (JSC "STCD"),
9A 2-ya Sinichkina St., bld. 3, 111020 Moscow, Russia

Abstract

The paper considers issues of developing modern systems for humidity monitoring of coolant leaks in pipelines and equipment of VVER reactor facilities in terms of meeting current requirements of the "leak before destruction" concept. For a humidity leakage monitoring system (HLMS), as a safety-related system of nuclear power plants, for the purpose of complying with current requirements for coolant leakage monitoring systems, scientific and technical solutions have been proposed aiming to address such important issues as increasing the sensitivity of monitored coolant leak values, increasing the reliability of leak detection results and the results of determining the coolant leak extent and location, as well as issues of improving the technological effectiveness and reducing the labor intensity of the operations to maintain the components of humidity measuring channels within the NPP containment in conditions of intense ionizing radiation. Modern systems for humidity monitoring of coolant leakage in pipelines and equipment of VVER reactor facilities meet the patent purity requirements in supply of humidity leakage monitoring systems to Russian and foreign NPPs. The paper considers the design and key technical characteristics of the humidity leakage monitoring system hardware complex. It is noted that the proposed humidity leakage monitoring system, as part of the "leak before destruction" concept, complies with current requirements for the sensitivity, speed and accuracy of measuring the leak extent and location, and is applicable for the VVER second circuit pipelines and equipment. Modern systems for humidity monitoring of coolant leakage in pipelines and equipment have been practically used for specific applications in NPPs with VVER reactor facilities.

Keywords: leak monitoring, pipeline, equipment, humidity 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 the Development of Modern Systems for Humidity Monitoring of Coolant Leaks in Pipelines and Equipment of VVER Reactor Facilities. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;1:65-80. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.05> (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;75(6):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., Dvornikov P.A., Budarin A.A., Kudryaev A.A., Kondratovich F.V., Polionov V.P., Portyanoy A.G., Konoplev N.I. Design of the Humidity Leak Monitoring System (HLMS) of Water Coolant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2008;2:30–35. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2008/02.pdf> (accessed May 10, 2024).

6. Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Budarin A.A., Kudryaev A.A., Molyavkin A.N., Shutov S.S., Zamiusskiy V.N., Savinov A.A., Shutov P.S., Chichkov A.G., Milshin V.I., Oznobishina M.D. Patent RU № 2756850 «Moisture measuring channel». Published on 06.10.2021. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2756850C1_20211006 (accessed May 10, 2024).

7. 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 № 2716281 «System of moisture control of pipeline leak of NPP». Published on 11.03.2020. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2716281C1_20200311 (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 № 2713918 «Heat exchanger leakage monitoring system of passive heat removal system by humidity method». Published on 11.02.2020. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2713918C1_20200211 (accessed May 10, 2024).

9. 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 № 2753422 «Leak control system of the equipment of the secondary circuit in the buildings of a light water power reactor». Published on 16.08.2021. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2753422C1_20210816 (accessed May 10, 2024).

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: dluk@diaprom.ru