

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЛАЖНОСТНОГО КОНТРОЛЯ ТЕЧИ ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ (СКТВ)

**С.А. Морозов\*, С.Н. Ковтун\*, П.А. Дворников\*, А.А. Бударин\*,  
А.А. Кудряев\*, Ф.В. Кондратович\*, В.П. Полионов\*, А.Г. Портяной\*,  
Н.П. Коноплев\*\***

*\* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

*\*\* ОКБ «Гидропресс», г. Подольск*



В статье приводится описание первой отечественной влажностной системы диагностики течей трубопроводов главного циркуляционного контура реакторных установок ВВЭР-1000. Рассмотрены структура, функции и технические характеристики системы.

Приведены результаты испытаний ее представительской части на стенде-имитаторе течей, подтверждающие способность системы обеспечить концепцию ТПР на РУ ВВЭР-1000.

Решение задачи своевременного обнаружения течей трубопроводов и оборудования контуров является одной из серьезных задач, возникающих при эксплуатации АЭС с водяным теплоносителем. Принятая в настоящее время концепция «течь перед разрушением» (ТПР) [1], предполагает применение как минимум трех систем контроля течей, работающих на различных физических принципах. Среди них, в первую очередь, следует назвать методы, основанные на контроле газовой активности, акустических шумов, а также влажностные методы.

Последние являются наиболее апробированными в методическом плане. В настоящее время накоплен опыт создания различных влажностных систем с применением разных типов первичных преобразователей. Системы имеют удовлетворительные технические и стоимостные характеристики. К их недостаткам следует отнести:

- зависимость чувствительности обнаружения течи от фоновых изменений влажности и динамики воздуха в помещениях;
- зависимость результатов измерений относительной влажности от температуры окружающей среды;
- существенные трудности в определении координат течи и ее интенсивности.

Как будет показано ниже, эти недостатки могут быть существенно преодолены при переходе от контроля интегральных (средних по помещениям) величин влажности к измерениям локальных величин и отслеживанию динамики их изменения.

В ГНЦ РФ-ФЭИ в течение многих лет ведутся разработки различных систем диагностирования протечек, в том числе основанных на измерении влажности. К настоящему времени эти разработки перешли из стадии научно-исследовательс-

---

© С.А. Морозов, С.Н. Ковтун, П.А. Дворников, А.А. Бударин, А.А. Кудряев,  
Ф.В. Кондратович, В.П. Полионов, А.Г. Портяной, Н.П. Коноплев, 2008

ких работ в стадию опытно-конструкторскую. Несколько влажностных систем внедрены на АЭС с РУ ВВЭР-1000 (3 блок Калининской АЭС, 1 и 2 блоки АЭС «Тяньвань»).

Концептуальные вопросы построения влажностных систем применительно к РУ ВВЭР рассмотрены в работах [2, 3]. В них указывается, что для того, чтобы наиболее полно обеспечить требования концепции ТПР, особенно по быстродействию обнаружения течи, необходимо распределить по петлям теплообмена датчики, измеряющие влажность воздуха в теплоизоляции трубопроводов. Это позволяет проводить анализ динамики пространственно-временных распределений влажности в теплоизоляции в режиме реального времени и тем самым выявлять источники истечения водяного теплоносителя. На базе этой концепции была создана СКТВ – система контроля течи (влажностная). Разработка выполнена в ГНЦ РФ-ФЭИ в тесном сотрудничестве со специалистами ОКБ «Гидропресс», Курчатовского института и приборостроительного института НИЦ «СНИИП».

СКТВ предназначена для своевременного обнаружения течи теплоносителя первого контура РУ с ВВЭР-1000 при работе энергоблока на различных уровнях мощности в режимах нормальной эксплуатации, с нарушением нормальной эксплуатации, а также в режиме «малая компенсируемая течь».

Объектами контроля СКТВ являются главный циркуляционный контур, трубопровод соединительный компенсатора давления, трубопроводы СА03.

СКТВ представляет собой автоматизированную систему контроля, в состав которой входят первичные преобразователи-датчики влажности (зонды выносные СКТВ-ЗВ) и узлы их крепления, кабельные линии связи (КЛС) и программно-технический комплекс. Взаимодействие этих элементов обеспечивает преобразование сигналов зондов выносных к виду, удобному для реализации алгоритма обнаружения течи посредством цифровой обработки первичной информации. Программно-технический комплекс СКТВ предусматривает автоматическое круглосуточное выполнение информационных и вспомогательных функций. В число информационных функций входят

- непрерывное измерение сигналов зондов выносных по всем задействованным каналам, оценка и сравнение параметров сигналов с уставками;
- обнаружение течи трубопроводов и оборудования первого контура;
- сбор, накопление и долговременное хранение регистрируемой информации с возможностью вывода архивированных данных по запросу оперативного персонала;
- обработка информации.

В случае обнаружения течи информация передается оперативному персоналу АЭС.

Вспомогательные функции обеспечивают

- контроль состояния технических средств СКТВ;
- сигнализацию о нарушениях в работе элементов системы;
- поддержание единого времени с системами энергоблока.

Программно-технический комплекс (ПТК) СКТВ построен на основе промышленного РС-совместимого компьютера, к которому подключены измерительные каналы и модули управления. Для связи с подсистемами АСУТП блока используются сетевые средства (тип связи Ethernet), обмен осуществляется по протоколу MODBUS TCP.

В основу работы СКТВ заложена модель, согласно которой при возникновении течи на одном из участков трубопровода перегретый пар от места течи распространяется в обе стороны от места течи по теплоизоляции трубопровода. При достижении парогазовым фронтом места установки зонда влажности часть парогаз-

зовой смеси будет проходить через его чувствительный объем, что приведет к росту показаний соответствующего канала измерения влажности. Поскольку зонды находятся на различных расстояниях от места течи, то моменты увеличения показаний каналов будут различными и зависящими от величины течи [3].

На основе анализа экспериментальных и расчетных данных, полученных на экспериментальных стендах и по расчетному коду «КУПОЛ-М», установлено, что в качестве информативных параметров алгоритма контроля течи могут быть использованы следующие измеряемые величины:

- локальная относительная влажность воздуха в теплоизоляции;
- температура воздуха;
- абсолютная влажность;
- моменты времени подхода парогазового фронта к зондам влажности на трубопроводе.

Алгоритм функционирования СКТВ основан на предположении, что, во-первых, распространение парогазовой смеси характеризуется достаточно четко выраженным фронтом; во-вторых, скорость распространения фронта зависит от величины течи. В этом случае скорость распространения фронта однозначно определяет величину течи, а разность времен прихода фронта к зондам влажности – координату течи. Этот простой вариант алгоритма адекватен реальности, если потери смеси невелики (под потерями понимается конденсация пара).

Величина течи ( $G_T$ ) вычисляется по формуле

$$G_T = K \cdot \bar{W}, \quad (1)$$

где  $K = f(D, l, v)$  – коэффициент пропорциональности;  $D$  – диаметр трубопровода;  $l$  – зазор между трубопроводом и теплоизоляцией;  $\bar{W}$  – скорость парогазового фронта, определяемая как

$$\bar{W} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (2)$$

где  $x_{i+1}$ ,  $x_i$  – координаты размещения двух соседних датчиков;  $t_{i+1}$ ,  $t_i$  – времена прихода фронта к датчикам;  $v$  – удельный объем перегретого пара при температуре подизоляционного пространства и атмосферном давлении.

В качестве первичных преобразователей использованы зонды выносные (СКТВ-ЗВ), предназначенные для измерения локальных значений температуры и относительной влажности воздуха в тепловой изоляции [3]. Зонд выносной СКТВ-ЗВ, разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ, прошел весь комплекс испытаний на устойчивость к внешним факторам, действующим на АЭС. Конструктивной особенностью зонда выносного является использование в качестве чувствительных элементов адсорбционно-емкостного преобразователя относительной влажности типа Н-1000 и платинового микропроводочного термометра сопротивления типа Pt-500.

Структурная схема комплекса технических средств СКТВ представлена на рис. 1.

Для преобразования параметров чувствительных элементов СКТВ-ЗВ в электрические сигналы разработаны специальные усилители-преобразователи (УП-01ВЦ), позволяющие исключить влияние емкости и сопротивление длинных линий связи на результаты измерения [4]. Для оперативных проверок состояния измерительных трактов в системе предусмотрено периодическое автоматическое подключение ко входам усилителей-преобразователей с помощью коммутатора К-01ВЦ эталонных конденсаторов и резисторов, равных по величине емкости влажностного чувствительного элемента и сопротивлению терморезистора. Эти элементы встроены в зонды влажности и переключаются с помощью специального микрореле, также находящегося в зонде и управляемого сигналами ПТК СКТВ.

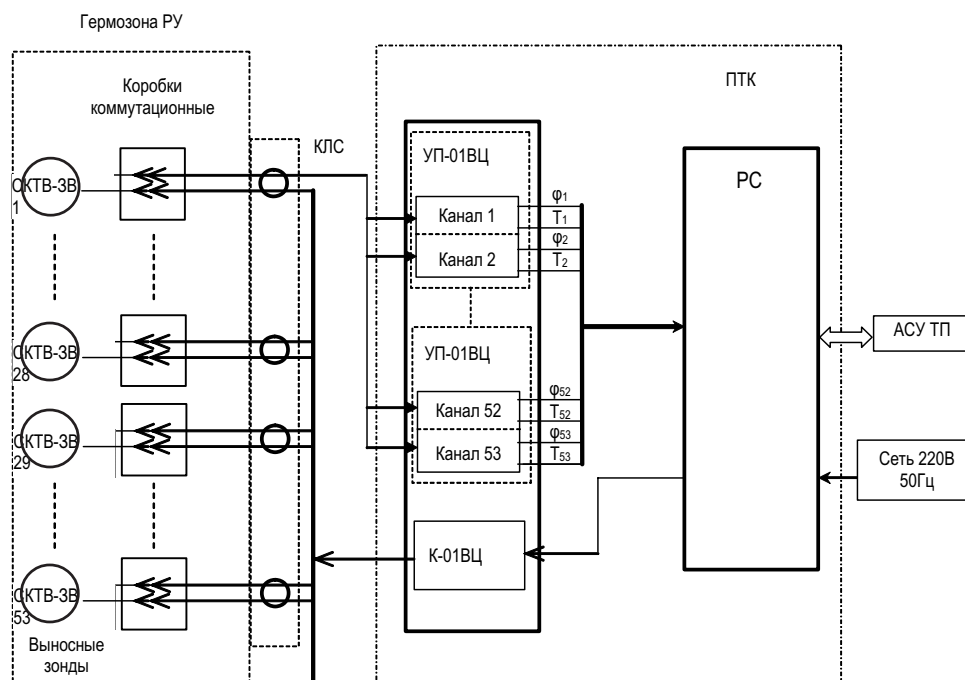


Рис. 1. Структурная схема КТС СКТВ

Зонды крепятся на оборудовании и трубопроводах реактора в гермозоне с помощью специальных стоек.

Кабельные линии связи (КЛС) предназначены для подключения сенсоров к усилителям-преобразователям и подачи сигнала для управления работой микрореле.

На выходах модулей усилителей-преобразователей формируются два напряжения: напряжение  $U_C$ , пропорциональное величине емкости сенсора влажности  $U_C = A \cdot C_C$  и напряжение  $U_{RT}$ , пропорциональное величине сопротивления сенсора температуры  $U_{RT} = B \cdot R_T$ ;  $A$ ,  $B$  – коэффициенты пропорциональности,  $C_C$  и  $R_T$  – параметры сенсоров соответственно.

Аналоговые сигналы  $U_C$  и  $U_{RT}$  посредством модулей аналогового ввода преобразуются в дальнейшем в цифровую форму (16-битное преобразование) и передаются в процессорный модуль системного блока, в котором производится вычисление по известным зависимостям величин относительной влажности, температуры и абсолютной влажности воздуха контролируемого участка оборудования РУ. Модули блоков усилителей-преобразователей выполнены в конструктиве «Евромеханика».

Для выполнения системой указанных выше функций разработано программное обеспечение на базе языков программирования C, C++, SQL, графических библиотек X Window и QT, а также библиотек интерфейсов прикладного программирования СУБД Postgres для языков C, C++.

Программа функционирования программно-технического комплекса СКТВ состоит из набора программных модулей, реализующих цели и задачи СКТВ. В число программных модулей входят модули ввода сигналов датчиков, обработки данных, отображения информации, передачи информации, модуль управления программными средствами, сетевого обмена.

Для реализации программного обеспечения СКТВ выбрана операционная система (ОС) LINUX RedHat 9.0. Она является некоммерческим вариантом UNIX с от-

крытым исходным кодом. Система LINUX RedHat 9.0 совместима с POSIX.1 и имеет в своем составе стандартные C-sh, Bash script интерпретаторы команд или совместимые на уровне скриптов.

Для подтверждения технических характеристик СКТВ были выполнены тестовые эксперименты на стенде течей. Стенд был специально создан в ОКБ «Гидропресс». Фактически на нем моделировался участок первого контура реакторной установки с блочной теплоизоляцией, примененной на энергоблоках с ВВЭР-1000 на АЭС «Бушер» и «Тяньвань». Основным элементов стенда был трубопровод длиной 10 м и диаметром 351×36 мм из стали 20 с установленной теплоизоляцией. На нем закреплены три зонда влажности для контроля влажности воздуха в подизоляционном пространстве. Два зонда находились на концах трубопровода, третий – в его средней части.

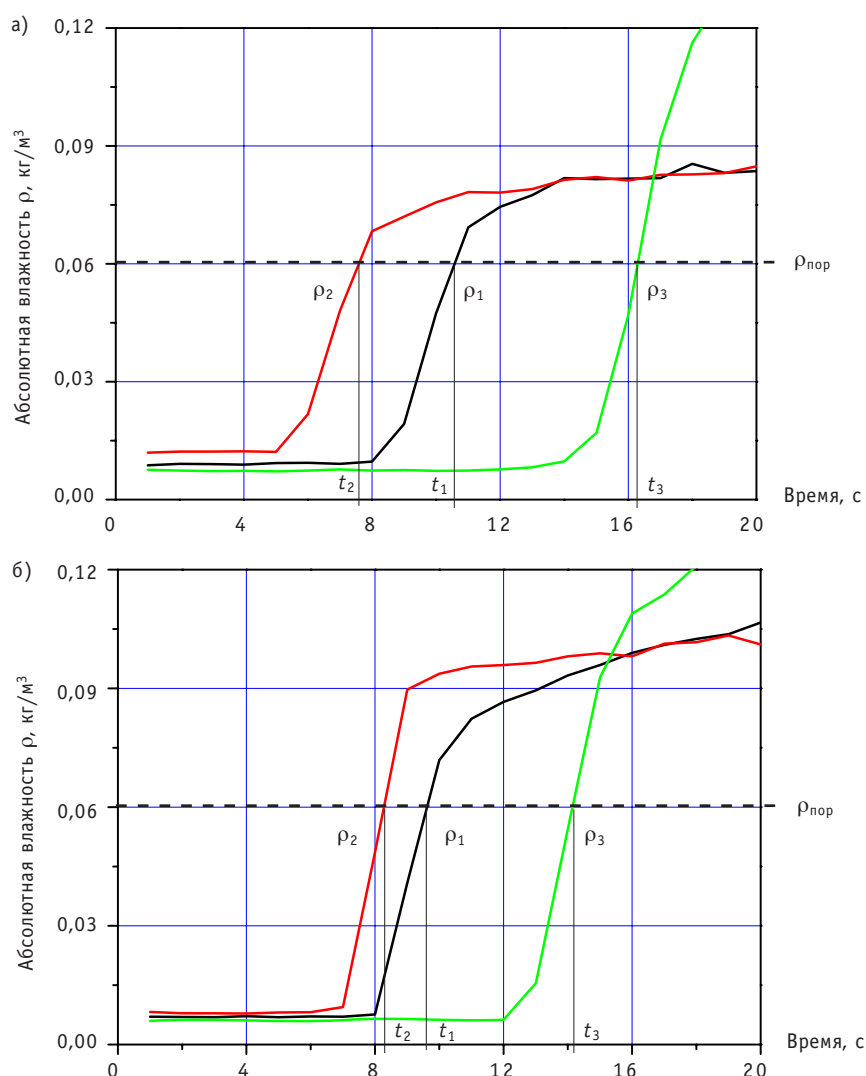


Рис. 2. Динамика изменения абсолютной влажности в местах размещения зондов влажности ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$ ) при течи расходом 5,1 (а) и 9,3 л/мин (б) (расстояние от места течей до зондов: до зонда №1 – 1,5 м; зонда №2 – 0,25 м; зонда №3 – 5,5 м);  $\rho_{\text{пор}}$  – уставка по абсолютной влажности, превышением которой определяются моменты прихода парогазового фронта ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) к зондам влажности

Проведенные на стенде испытания подтвердили принципы, заложенные в структуру и функционирование системы. Она уверенно фиксировала все имитируемые течи даже с величиной меньшей на порядок, чем это требовалось по техническому заданию, и определяла их координату.

На рис. 2 для примера приведены результаты экспериментов с имитацией течей различной интенсивности. Можно видеть, что фронтальный характер распространения парогазовой смеси в теплоизоляции трубопровода со скоростью, зависящей от величины течи, подтверждается. Расчетная оценка величины течи и ее координаты с учетом реальных моментов приходов фронтов к местам установки зондов (указаны на рисунках) отличались от данных экспериментов не более чем на 30%.

Временные характеристики системы оказались также вполне удовлетворительными. Запоздывание с выдачей сообщения о факте и параметрах течи по отношению к моменту ее возникновения не превышало одной минуты, что заметно меньше заданного в технических требованиях на систему.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Система СКТВ построена на современной элементной базе, обеспечивает выполнение таких важных функций контроля, как обнаружение факта течи, определение ее места и величины, удовлетворяет заданным требованиям по чувствительности и по быстродействию.

Система установлена на третьем блоке Калининской АЭС и на первом и втором блоках АЭС «Тяньвань». За время опытной эксплуатации продемонстрировала хорошие эксплуатационные характеристики в части устойчивости показаний к различным возмущающим факторам. На третьем блоке Калининской АЭС позволила зарегистрировать факт аномального изменения параметров влажности воздуха в гермозоне при нарушении технологического процесса.

## **Литература**

1. Киселев В.А., Ривкин Е.Ю. Применение концепции течь перед разрушением при анализе безопасности АЭС // Атомная энергия. – 1993. – Т. 25. – Вып. 6. – С. 426–430.
2. Морозов С.А., Полионов В.П., Портяной А.Г. и др. Система влажностного контроля течи трубопроводов АЭС/Патент РФ №2271045 // Бюл. Изобретения. Полезные модели. – 2006. – №6. – С. 12.
3. Морозов С.А., Портяной А.Г., Полионов В.П. и др. Разработка влажностной системы контроля течи трубопроводов ВВЭР // Атомная энергия (в печати).
4. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Полионов В.П., Бударин А.А. Разработка канала для измерения влажности воздуха в помещениях АЭС/Препринт ФЭИ-3079, 2006 г.

Поступила в редакцию 12.05.2008

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.526

*The problems of an Improvement of Fast Neutrons Reactors \O.D. Kazachkovsky; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages. – References – 3 titles.*

The question on creation of fast neutrons reactors of the second-generation, working on a closed fuel cycle, is considered. The measures on essential improvement of their technical and economic characteristics are offered. Most radicals of them – use a gaseous dynamic power cycle and refusal of an intermediate contour of the heat-transfer. The advantages of use of dry methods, and in particular pyroelectrolitics of processing of the irradiated fuel are shown. It is taken into account as well an increase of the requirements on non-distribution of nuclear materials.

### УДК 621.039.58

*Consideration of Aging Effect in Reliability and Safety Analysis of NPP Equipment Functioning \A.V. Antonov, A.A. Polyakov, A.N. Rodionov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References – 5 titles.*

The paper presents method of accounting equipment aging. Positive trend of rate of failures in time is identifies by statistical methods based on operating information. Calculates punctual and interval estimation parameters of rate of failures trend. Evaluation of statistical magnitude for trend parameters is performed. Invented method a illustrated by example of analysis rate of failures for one of pumping equipment aggregate of nuclear power unit.

### УДК 621.039.58

*Impovement of Software for Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Installations \A.M. Bakhmetiev, I.A. Bylov, A.V. Dumov, A.S. Smirnov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References – 4 titles.*

Development of complicated logical-and-probabilistic model of nuclear installation during probabilistic safety assessment performance and subsequent model research are impossible without of appropriate software. In this article review of software packages using now for probabilistic safety assessment of nuclear power objects is implemented. Here is presented a brief description of CRISS software package which is the first domestically produced software applied in practice of probabilistic safety assessment of nuclear installations.

Here are presented main directions of improvement of CRISS software package: realizing of software on a «client-server» network architecture based on «Oracle» database management system with regulation of users rules, enhancing of software functionality, extension of models using for qualitative analysis, adding of block for failure modes and effects analysis, quality assurance during software using and automatized import of models developed by similar software.

### УДК 621.039.564.5

*Design of the Humidity Leak Monitoring System (HLMS) of Water Coolant \S.A. Morozov, S.N. Kovtun, P.A. Dvornikov, A.A. Budarin, A.A. Kudryaev, F.V. Kondratovich, V.P. Polionov, A.G. Portyanoy, N.P. Konoplev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 2 illustrations. – References – 4 titles.*

The description of the first domestic humidity system of diagnosing leaks in the pipelines of the main circulation circuit of WWER-1000 reactor installations is presented in the article.

The structure, functions and technical characteristics of the system are described.

The results of testing the presentation component of the system at the facility-simulator of leaks are presented that verifies the ability of the system to assure the Leak-Before-Break (LBB) concept at RI WWER-1000.