

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЗОНДОВОГО СИГНАЛИЗАТОРА УРОВНЯ КИПЯЩЕГО ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В.И. Мельников*, В.В. Иванов*, В.Н. Хохлов*, А.В. Дунцев*,
Е.А. Семенов**, Ю.А. Киселев**, А.Н. Синицын**, И.Н. Киселев**,
А.В. Белин**

** Нижегородский государственный технический университет, г.Н. Новгород*

*** Опытное конструкторское бюро машиностроения, г. Н. Новгород*



В статье приведены результаты стендовых испытаний многоточечного акустического сигнализатора уровня в кипящем водяном теплоносителе высоких параметров в нормальных и аварийных условиях реакторной установки. Сигнализатор определяет фазовое состояние среды в двадцати четырех локальных объемах, распределенных по высоте контролируемого объема в реальном масштабе времени, и вычисляет объем воды в сосуде. Описываются конструкция прибора, разработанное программное обеспечение, результаты лабораторных и стендовых испытаний системы.

Уровень теплоносителя в реакторной установке является важнейшим технологическим параметром, определяющим как ее нормальную эксплуатацию, так и развитие аварийных режимов. Отметим особую важность и сложность контроля уровня кипящего теплоносителя. Такой контроль необходим для управления работой парогенераторов АЭС, ядерных установок моноблочного исполнения, кипящих реакторов и при исследованиях тепломассообмена в энергетическом оборудовании, в частности, в экспериментах по изучению аварийных процессов.

Уровнемер является важнейшим компонентом системы обеспечения безопасности при разгерметизации первого контура реакторов кипящего типа и реакторов под давлением. Технические характеристики уровнемера должны быть таковы, чтобы система безопасности оперативно обнаруживала начальную стадию потери теплоносителя, оценивала размер течи и своевременно регистрировала опасное уменьшение количества теплоносителя в контуре, что необходимо для осуществления соответствующих защитных действий, в частности, для запуска систем глушения реактора, аварийного теплоотвода, включая аварийную проливку активной зоны, и т.д. Кроме того, в ряде применений весьма ценной является информация об объемном распределении жидкости или газа (парогазовой смеси, пара) по высоте сосуда.

В настоящее время такой контроль обычно производится устройствами различного типа, фиксирующими уровень жидкой фазы непрерывно или дискретно. Одна-

ко принципы действия таких устройств не позволяют решать весь комплекс поставленных задач с требуемой полнотой, оперативностью, надежностью и точностью. Термометрические средства контроля уровня [1] имеют время реакции в 30 с и более, а при объемном вскипании теплоносителя их показания становятся неопределенными и практически не позволяют решать задачу оценки размера разгерметизации и формирования достоверной информации о количестве жидкости в контуре для целей защиты.

В работах [2,3] нами предложена методика и измерительная система на основе ультразвуковых волноводных зондов, позволяющая контролировать распределение объемной концентрации газовой фазы по высоте с любым заданным шагом в реальном масштабе времени. Общее количество жидкой фазы теплоносителя в сосуде, а также величины уровней (весового, объемного, гидродинамического и т.д.) находятся при помощи простых вычислений. Основы теории и конструирования зондовых датчиков приведены в монографии [4].

Конструкция многоточечного ультразвукового сигнализатора уровня для реакторной установки моноблочного типа была разработана совместно сотрудниками Нижегородского технического университета (НГТУ) и Опытного конструкторского бюро машиностроения (ОКБМ). Сигнализатор был изготовлен в ОКБМ и успешно прошел теплофизические испытания в натурном теплофизическом стенде. В настоящей работе приводятся результаты этих испытаний при различных сценариях развития аварийных процессов.

Сигнализатор уровня состоит из акустозондового датчика и электронного блока генерации и обработки сигналов. Для накопления и обработки информации в процессе испытаний использовался персональный компьютер.

Датчик состоит из четырех герметичных чехловых труб, внутри которых размещено по 12 волноводов (рис. 1). Трубы скомпонованы в систему, состоящую из двух пар параллельных друг другу труб. Каждая пара содержит одну трубу с размещенными в ней излучающими волноводами и вторую – с приемными. На верхних торцах всех волноводов установлены электромеханические пьезопреобразователи. Нижние концы волноводов выведены из труб через боковые отверстия и загерметизированы специальными элементами в виде двойных конусов, обеспечивающих проводку акустических колебаний в теплоноситель. Таким образом, излучающие и приемные волноводы одной пары чехловых труб формируют 12 контролируемых объемов датчика, размещенных по высоте с шагом 200 мм. Аналогичные компоненты содержит вторая пара труб, формирующая второй набор контролируемых объемов. В конструкции датчика эти две пары труб смещены друг относительно друга по высоте на 100 мм. В результате образуется двадцать четыре контролируемых объема, расположенных по высоте с шагом 100 мм. В совокупности контролируемые объемы формируют измерительный участок уровнемера высотой 2400 мм.

Чехловые трубы скреплены дистанционирующими элементами и заварены в герметизирующем контур фланце. В конструкции датчика также предусмотрена защита от излучений активной зоны через чехловые трубы СУ. В верхней части датчика размещены сорок восемь согласующих трансформаторов и разъемы для подключения 4-х соединительных кабелей.

При установке датчика на объекте верхняя его часть с размещенными внутри пьезоэлементами и другими электротехническими компонентами оказывается над крышкой реактора вне зоны воздействия высоких температур и излучения, что обеспечивает их ресурсную работоспособность. В аварийной ситуации электротехническая часть датчика и соединительный кабель (и датчик в целом) сохраняют работоспособность до 2-х ч при температуре до 180°C с последующим охлаждением в течение суток.

Подчеркнем, что каждая из чехловых труб выполнена герметичной, поэтому в случае повреждения любой из них уцелевшая пара может работать в нормальном режиме, увеличится лишь шаг определения уровня со 100 до 200 мм. Фактически обеспечивается 100%-резервирование.

Волноводы изготовлены из проволоки диаметром 0,8 мм; чехловые трубы имеют диаметр 25×2 мм; общая длина датчика 5 м; материал датчика сталь 12Х18Н10Т. Используются пьезоэлементы из керамики ЦТС-19 диаметром 2,5 мм.

Основные технические характеристики датчика. Число каналов измерения паросодержания 24. Расстояние по высоте между соседними контролируемыми объемами 100 мм. Высота измерительного участка контролируемого сосуда 2400 мм. Описанный внутренний диаметр под установку датчика СУ 100 мм. Максимальная рабочая температура 360°C; давление 25 МПа.

Электронный блок состоит из двух независимых частей, каждая из которых при помощи 2 кабелей связи присоединена к пьезоэлементам и соответственно волноводам, установленным в своей паре чехловых труб датчика, управляется своим микропроцессором и запитывается от отдельного источника питания (100-процентное резервирование).

Электронный блок выполняет следующую последовательность операций:

- генерирует зондирующие импульсы заданной длительности и частоты следования для активации пьезоэлементов излучателей;
- усиливает принятые акустические импульсы, прошедшие через контролируемые объемы;
- производит временную селекцию принятых сигналов и определяет их амплитуды;
- оцифровывает полученные данные и записывает результаты в память;
- вычисляет уровень жидкой фазы теплоносителя и передает полученное значение в аналоговом и цифровом виде (RS-485) оператору;
- сигнализирует об опасном снижении уровня и вырабатывает сигналы для системы аварийной защиты;

• кроме того, в автоматическом режиме осуществляет проверку прохождения ультразвуковых сигналов по волноводам, выдавая сигналы об их целостности или повреждении (самопроверка); при обнаружении неисправных каналов (не более заданное число) блокирует считывание информации с них и корректирует алгоритм расчета уровня с учетом исключенных из работы каналов.

Система работает согласно алгоритму, изложенному в статье [2]. Для исключения

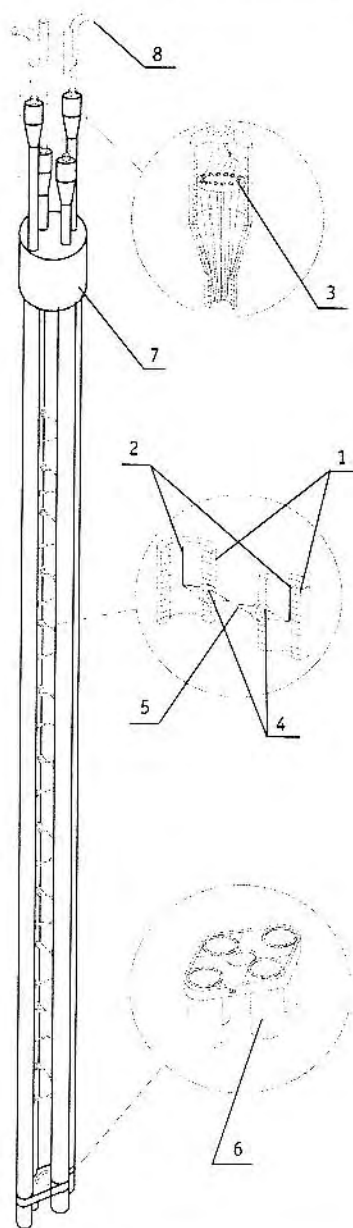


Рис. 1. Схема датчика акустического сигнализатора уровня: 1 — чехловые трубы, 2 — волноводы, 3 — электромеханические преобразователи, 4 — двойные конуса, 5 — контролируемый объем, 6 — дистанционирующий элемент, 7 — узел ввода, 8 — электрические кабели

влияния помех при каждом запуске ультразвукового зондирующего сигнала работает только один излучающий канал и система считывает принятый сигнал только одного принимающего канала. Период полного цикла опроса датчика 50 мс.

Для проведения испытаний использовался стенд ОКБМ Л-800, состоящий из модели реактора интегрального типа со встроенным компенсатором давления; газового баллона объемом около 0,5 м³ для ввода газа (воздуха), буферной емкости объемом около 2,2 м³, предназначенной для приема пара и теплоносителя в динамических режимах, и информационно-измерительной системы. В нижней части модели располагались электрические нагреватели общей мощностью 360 кВт, имитирующие в тепловом отношении активную зону реактора и предназначенные для разогрева теплоносителя до заданных программой параметров. Контроль уровня в модели проводился при помощи поплавкового уровнемера и гидростатическим методом по перепаду давления, который определялся при помощи дифманометра «Сапфир-22ДД» (рис. 2).

Исследования акустозондового уровнемера проводились в «статических» режимах, характеризующихся медленным изменением уровня теплоносителя в контролируемом объеме, и «динамических» режимах быстрого сброса давления, имитирующих аварийные ситуации с потерей теплоносителя (LOCA). Максимальная скорость изменения давления при этом соответствовала максимальной расчетной скорости изменения давления при аварии с разрывом трубопровода $\text{dy}48$.

В «статических» режимах производилось медленное изменение уровня теплоносителя в МР при следующих условиях:

- температура воды $20 \pm 5^\circ\text{C}$, давление атмосферное;

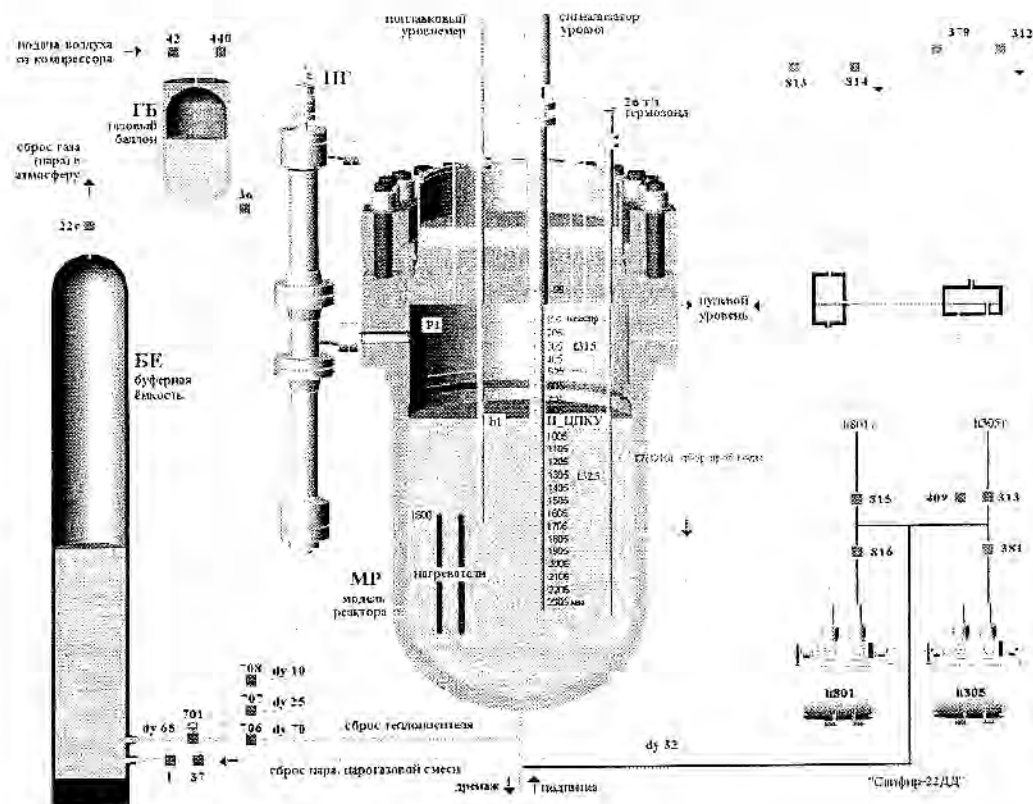


Рис. 2. Функциональная схема стенда Л-800

- температура воды $20 \pm 5^\circ\text{C}$, давление $1,4 \pm 0,5$ МПа;
- температура воды $345 \pm 5^\circ\text{C}$, давление $15,0 \pm 0,5$ МПа, режим паровой;
- температура воды $345 \pm 5^\circ\text{C}$, давление $15,0 \pm 0,5$ МПа, режим парогазовый.

Температура теплоносителя перед проведением «динамических» режимов составляла $345 \pm 5^\circ\text{C}$, давление – $15,0 \pm 0,5$ МПа. Режимы отличались между собой средой, находившейся над уровнем теплоносителя. Применялись пар и парогазовая смесь.

После монтажа сигнализатора уровня на стенде Л-800, проведения пуско-наладочных работ и настройки технических параметров электронного блока уровнемера, система контроля уровня была готова к работе. При проведении измерений параметры стенда фиксировались с помощью системы АСНИ.

В начале проводились измерения в стационарных режимах при температуре теплоносителя $20 \pm 5^\circ\text{C}$, атмосферном и повышенном давлениях.

Показания трех типов уровнемеров (акустозондового, поплавкового и гидростатического) в процессе заполнения и дренажа воды из модели реактора с остановками на высотах расположения контролируемых объемов зондов акустозондового датчика приведены на рис. 3.

Показания гидростатического уровнемера корректировались с учетом реального распределения температуры среды в модели реактора по высоте, зафиксированного

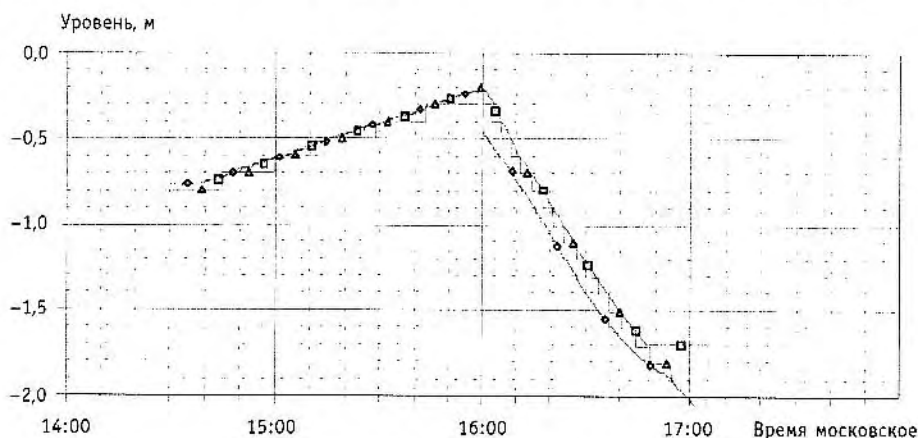


Рис. 3. Показания акустозондового, поплавкового и гидростатического уровнемеров при заполнении и осушении модели реактора ($P = 0,1$ МПа, $t = 20^\circ\text{C}$): \square – h_1 ; \diamond – h_{801r} ; \triangle – $H_{\text{ЦПКУ}}$

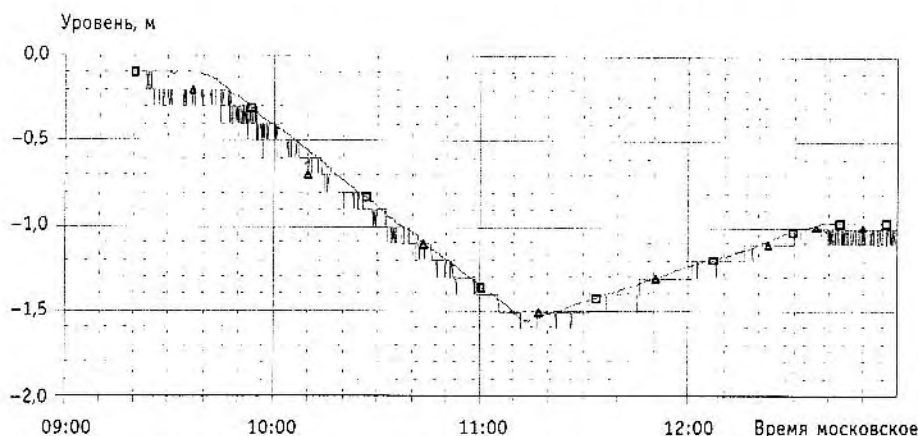


Рис. 4. Показания акустозондового и поплавкового уровнемеров при заполнении и осушении модели реактора ($P = 15,45$ МПа, $t = 342^\circ\text{C}$): \square – h_1 ; \triangle – $H_{\text{ЦПКУ}}$

26-точечным термозондом. Некоторое отличие данных, полученных при дренаже теплоносителя, объясняется уменьшением давления в «минусовой» ветке измерителя перепада давления, подключенной к дренажному трубопроводу, за счет гидравлических потерь и наличия скоростного напора.

Показания акустозондового и поплавкового уровнемеров при плавном изменении уровня при высоких параметрах теплоносителя и паровой компенсации давления приведены на рис. 4. Методика проведения эксперимента была следующей. Стенд полностью заполнялся дистиллятом и подключался к буферной емкости, заполнен-

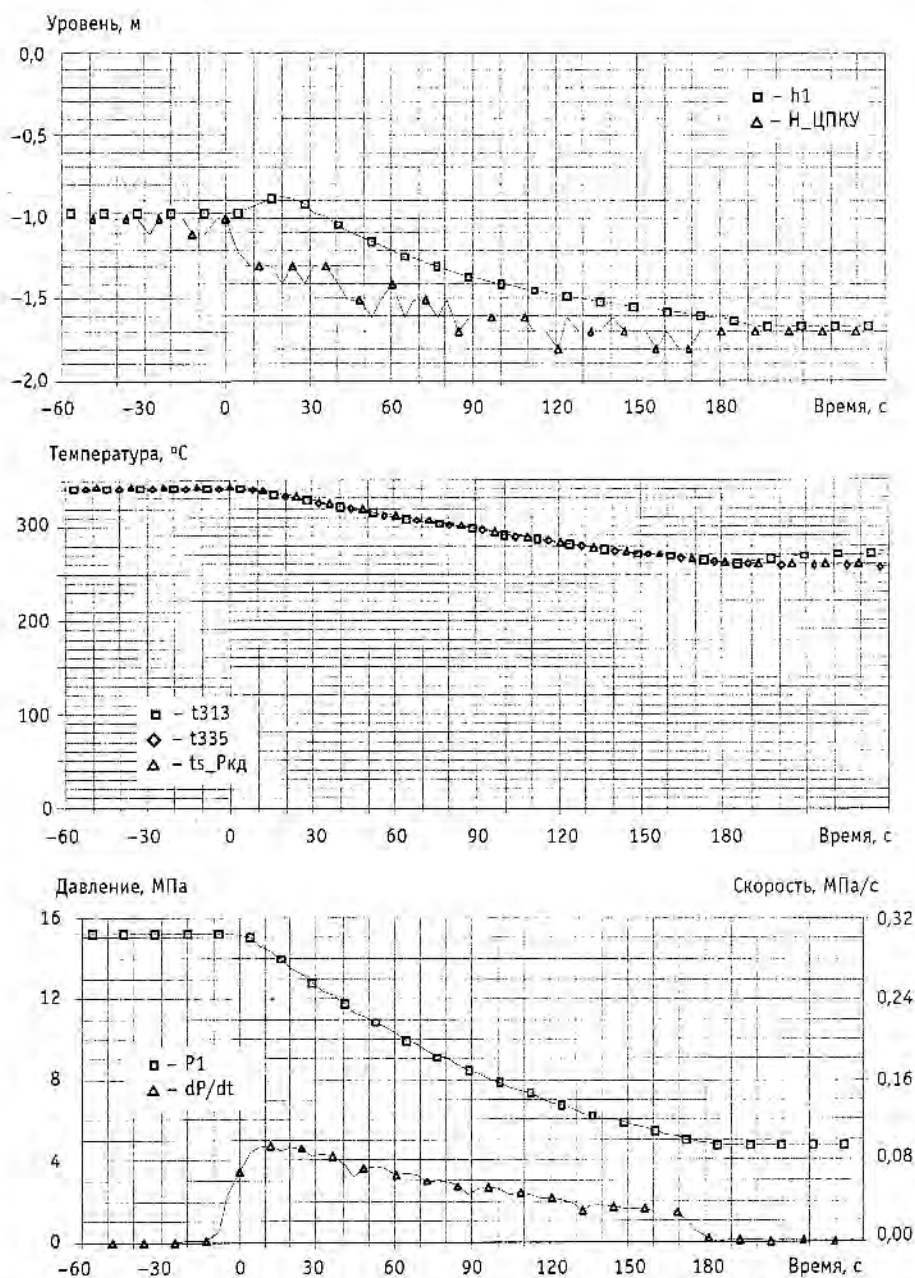


Рис. 5. Показания акустозондового и поплавкового уровнемеров и изменение параметров модели реактора во времени при сбросе давления

ной до уровня около 1 м. С помощью компрессора в системе создавалось давление около 10 МПа; за счет внутренних нагревателей стенда теплоноситель разогревался до 342°C; при давлении около 15 МПа система стабилизировалась путем дренажа излишней (расширяющейся при нагреве) воды в дренажный бак. После достижения стационарного состояния с $t \approx 342^\circ\text{C}$ и $P \approx 15$ МПа буферная емкость отсекалась и проводился медленный дренаж теплоносителя из модели реактора, сопровождавшийся образованием над уровнем воды паровой подушки. После достижения теплоносителем уровня 1,6 м от нижней поверхности крышки (уровень верхнего торца внутренних нагревателей стенда) дренаж воды останавливали и начинали заполнять модель реактора водой при помощи подпиточного насоса.

Аналогичные результаты были получены при парогазовой компенсации давления.

Рассмотрение полученных графиков позволяет сделать вывод о фактическом совпадении показаний исследуемого сигнализатора уровня и штатных уровнемеров стенда. Функционирование сигнализатора уровня в этих режимах вполне удовлетворительно.

Поведение акустозондового уровнемера в динамическом режиме при сбросе давления, имитирующего аварийную ситуацию с потерей теплоносителя типа LOCA, показано на рис. 5.

На изменение уровня оказывают влияние пузырьки пара, образующиеся в объеме теплоносителя при его вскипании. Появление пузырьков, а также особенности алгоритма вычисления уровня, приводит к некоторому снижению показаний в аварийных режимах разгерметизации контура относительно режимов без кипения. Следует заметить, что занижение показаний уровнемера в аварийных режимах разгерметизации (относительно поплавкового), вызванное появлением пузырей пара, обеспечивает консервативный подход к управлению реактором, т.е. срабатывание АЗ по снижению уровня произойдет несколько раньше, «с запасом», чем задано уставкой. Внешний вид датчика сигнализатора уровня и вторичного прибора приведены на рис.6 и 7.

Показания каждого из датчиков сигнализатора уровня в динамических режимах представлены на рис. 4, 5 и 6. На них отчетливо видны пузырьки пара в водном объеме теплоносителя, а также граница раздела сред, обозначенная черной жирной линией. На указанных рисунках нанесены также показания поплавкового уровнемера Л968 01СП и черной тонкой линией – выходные показания СУ, определяемые количеством точек, находящихся в воде. Очевидно, что уровень, вычисленный суммированием количества «точек» СУ, находящихся в воде, ниже указанной на графиках границы раздела «вода – парогазовая смесь».

Полученные данные позволяют сделать вывод о достаточно надежном функционировании акустозондового уровнемера в режимах разгерметизации реакторной установки.



Рис. 6. Внешний вид датчика сигнализатора уровня

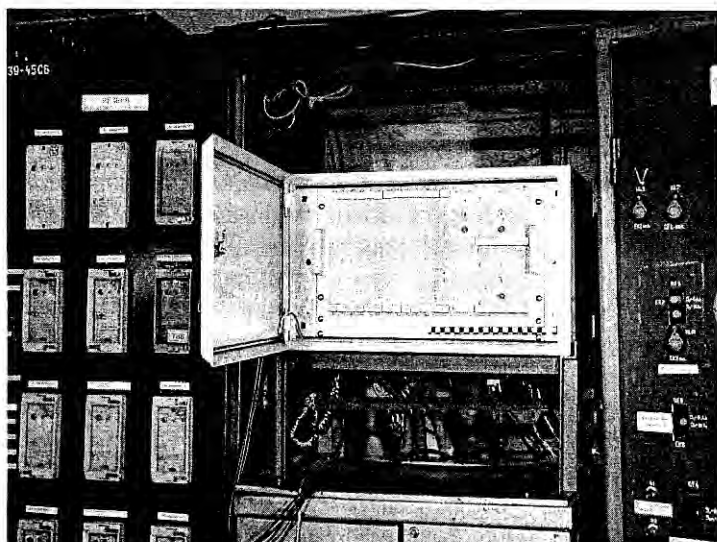


Рис. 7. Внешний вид вторичного прибора сигнализатора уровня

ВЫВОДЫ

1. Предложена система определения уровня кипящего теплоносителя, основанная на измерении распределения паровой фазы по высоте акустическими зондами (датчиками).

2. Разработана методика, позволяющая в режиме реального времени осуществлять оперативный контроль за количеством теплоносителя в реакторных установках с естественной циркуляцией и моноблочного исполнения на всех режимах их работы, а также в других изделиях, где необходим контроль уровня рабочих и аварийных условий их эксплуатации.

3. Испытания показали, что исследованная конструкция сигнализатора уровня обеспечивает надежное его функционирование при параметрах среды и скоростях их изменения, заданных программой экспериментов, при низкой инерционности.

4. В аварийных режимах при разгерметизации реактора из-за наличия в объеме теплоносителя пузырьков пара и особенностей алгоритма вычисления уровня электронным блоком СУ его показания несколько ниже, чем в режимах без кипения, что обеспечивает консервативность в управлении ППУ (срабатывание АЗ по снижению уровня происходит несколько раньше, чем задано уставкой).

5. Разработанный прибор может быть использован в любых изделиях для контроля уровня и плотности среды, а также экспериментах по изучению развития аварийных процессов в теплофизическом оборудовании, при отработке элементов энергетического оборудования, в процессе технологических испытаний.

Литература

1. Monitoring water levels in VVER pressure vessels. Nuclear Engineering International. March 2001.
2. Мельников В.И., Дунцев А.В., Вьюгин А.Б. Исследование акустозондовой системы определения уровня кипящего водяного теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – №4. – С. 100-106.
3. Лабутин С.А., Мельников В.И. Ультразвуковые волноводные измерители параметров однофазных и двухфазных сред и потоков//Датчики и системы. – 2001. – №2. – С. 54-62.
4. Мельников В.И., Усынин Г.Б. Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

Поступила в редакцию 25.07.2005

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.58

On the Problem of System Investigation of Nuclear Plant Safety using Probabilistic Methods \A.M. Bakhmetiev, I.A. Bylov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 13 titles.

Approaches to methodical support, program complexes, organizational procedures for system safety investigation of different type and purpose plants with the help of probabilistic methods are stated.

УДК 621.039.58

On the System of BN-600 Power Unit Safety and Reliability Monitoring \A. Bakhmetiev, J. Kamanin, J. Makeev, L. Popov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 7 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

Status of BN-600 plant reliability and safety monitoring system development is presented. Goals of system creation, contents of its main elements, characteristics of developed computer database are stated. Some results of statistic analysis of plant operating experience are given.

УДК 621.039.58

Steam Generator Heat-Exchange Tubes Contamination Analysis and Inter-Washing Period Estimation using Diffusion Process Method \O.M. Gulina, K.A. Kornienko, M.N. Pavlova; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 2 illustrations, 2 tables. – References, 5 titles.

Periodical washing of SG heat-exchange tubes delays the rate of local corrosion processes and is one of the ways of lifetime management. Was approximated statistical dependence of number of muffled tubes from the height of tubes lattice and from specific contamination. Was developed an equation of non-linear up growth for specific contamination. Values of SG inter-washing period for different levels of contamination with approximation results were calculated using diffusion processes theory methods.

УДК 621.039.534

The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Water Boiling Coolant \V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, V.N. Chocklov, A.V. Dunzev, E.A. Semenov, Y.A. Kiselev, A.N. Sinicin, I.N. Kiselev, A.V. Belin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The acoustic probe system for a level and amount of liquid phase analysis into control volume on examination of a vapor distribution along the height has been studied.

The principle of function of the probe is based on the determination of an amplitude of ultrasound signals. Vapor phase is indicated according to significant reduction of the amplitude of ultrasound impulses, if vapor bubbles put into control volume.

The waveguides probes operating in frequency band near 600kHz are placed in the transducer; the pulse recurrence frequency is 800Hz.

The measuring system by computer PC controls the service of electronic bloc and it makes possible the experimental data processing.

The acoustic probe system allows to determinate the state of phase into 8 local volumes by probes placed along the height of vessel and to study dispersing properties of the vapor liquid water mixture.

The testing of the level gage has carried out by air-lift system at normal temperature and pressure and by special stand high pressure conditions, where the boiling process of coolant is initiated by depressurization of stand.

The construction of the acoustic devices, computer programs, laboratory and testing unit experiments are described.

УДК 621.039.58

Neutron Freccasting to Provide for Seismic Safety of NPP \ Yu.A. Rogozhin, I.P. Shestopalov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

As it is known, various natural factors, in particular earthquakes, can render influence on NPP work. The data on seismic energy, allocated from the earthquake sources on all globe for the period with 1680 on 2004 in comparison to cycles of solar activity, are analyzed. The 11-year's cycles of seismic activity on the Earth are revealed. The cyclic changes of seismic activity with duration in three solar cycles and century cycles are marked out also. A correlation between solar and seismic activity mainly negative, but the correlation between them can be positive under influence of powerful solar proton events. The strongest earthquakes occur in the beginning of the century cycle. In the ninetieth years of the last century there has come a new century cycle, in which beginning, during several tens years, the strong seismic activity will be marked. It is shown, that the seismic activity is accompanied by burst of neutrons, that directly can influence on NPP work. A new approach to forecasting of earthquakes develops by means of neutron monitoring, that at the end promises to raise seismic safety of NPP.

УДК 623.454.862: 628.4.047

Multi-Criteria Analysis for Evaluating the Radiological and Ecological Safety Measures in Radioactive Waste Management \ T.G. Sazykina, I.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 2 illustrations, 3 tables. – References, 6 titles.

A methodological approach is presented for multi-criteria evaluating the effectiveness of radiological and ecological safety measures in radioactive waste management. The approach is based on multi-criterial analysis with consideration of radiological, ecological, social, economical consequences of various safety measures. The practical application of the multi-criteria approach is demonstrated by the example of decision-making on the most effective actions for rehabilitation a water body contaminated with radionuclides.

УДК 621.039.512

Temperature Effects Influence on Secondary Energy Distributions of Scattered Neutrons in the Resonance Region \ V.V. Kolesov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

It is customary to neglect the effect of thermal motion (Doppler effect) and resonance behavior of the elastic scattering on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region. As has been shown early, instead of usual step-function for the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region it needs to use more exact expression.

At this work we have researched the nuclei thermal motion and resonance behavior of the neutron elastic scattering influence on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region for a number of important nuclei, as ^{238}U , ^{240}Pu , ^{235}U , ^{155}Gd and ^{167}Er .

УДК 621.039.516.2

The Assessment of Voce Coefficient for WWR-c Reactor \ O.Y. Kochnov, N.I. Ribkin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 4 illustrations. – References, titles.

The air volume influence in WWR-c reactor core on the total reactivity was analyzed in this article. The experimental dates of voce coefficient depending on the air volume position inside reactor core was done.