

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛИЗАТОРОВ УРОВНЯ ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯЭУ**

**В.И. Мельников, В.В. Иванов, И.А. Тепляшин, Ю.А. Киселев, А.Н. Синицын, А.В. Белин**

Рассмотрены принципы работы многоточечных акустических сигнализаторов уровня жидкости импедансного типа на основе волноводов изгибных и крутильных волн. Представлены конструкции с кольцевыми и стержневыми чувствительными элементами, предназначенными для контроля уровня водяного теплоносителя в ядерных реакторах. Приведены результаты стендовых испытаний опытных образцов сигнализаторов в условиях близких к реальным.

*Ключевые слова: сигнализатор уровня жидкости, акустический волновод, изгибные и крутильные волны, пьезопреобразователь, ядерный реактор.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Уровень теплоносителя является важнейшей технологической характеристикой реакторной установки, определяющей ее нормальную и безопасную работу. В частности разгерметизация первого контура может вызвать осушение активной зоны, нарушению теплообмена и ее плавлению. Поэтому приборы контроля уровня относятся к важнейшим компонентам системы безопасности ядерной энергетической установки (ЯЭУ).

Учитывая высокие параметры теплоносителя (температура до 350°C, давление до 18МПа, высокий уровень радиации), измерение уровня является сложной технической задачей. Дополнительные сложности возникают при кипении теплоносителя, которое может развиваться, например, при переходных процессах и в аварийных ситуациях.

На практике применяют конструктивное исполнение датчика в виде многоточечного сигнализатора жидкой (газовой) фазы теплоносителя по высоте контролируемой емкости, в том числе для устранения сложной проблемы метрологической аттестации прибора. В результате получают уровнемер дискретного действия с фиксированным шагом контроля уровня, не требующего получения метрологического сертификата.

Наиболее приемлемыми для решения задачи контроля уровня водяного теплоносителя в реакторных установках, по нашему мнению, являются акустические методы, основанные на использовании металлических волноводов. Их при-

менение позволяет создавать датчики со значительным ресурсом, способными проводить измерения практически безинерционно и работать в экстремальных условиях ядерной установки продолжительное время. Теория и техника волноводных датчиков, использующих различные типы нормальных волн, описана нами в работе [1].

Созданные на основе волноводов продольных волн 24-х точечные сигнализаторы уровня акустозондового типа были установлены в реакторе стенда КВ-2 и успешно эксплуатировались в течение 3-х лет. Результаты стендовых испытаний этих сигнализаторов в кипящем водяном теплоносителе высоких параметров, а также опыт их эксплуатации приведены в работах [2,3].

### **КОНСТРУКЦИЯ СИГНАЛИЗАТОРОВ УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

В статье [4] нами представлены конструкции новых одноточечных акустических датчиков для сигнализаторов уровня импедансного типа с кольцевым и стержневым чувствительными элементами на основе изгибных и крутильных волн. Технические решения, отработанные в процессе их серийного производства, были использованы при конструировании датчиков многоточечных сигнализаторов контроля уровня теплоносителя для ЯЭУ. Опытные образцы сигнализаторов изготовлены и прошли испытания на теплофизическом стенде ОКБМ в условиях весьма близких к реальным.

Опытный образец датчика сигнализатора уровня с кольцевыми чувствительными элементами включает восемь чувствительных элементов, сформированных токарными выточками глубиной 1,5мм и шириной 2мм на внутренней стенке чехловой трубы диаметром 24х3мм. Чувствительные элементы расположены с шагом 100мм друг от друга и соединены с пьезопреобразователями волноводами связи диаметром 0,8мм. Пьезопреобразователи продольных волн расположены в верхней части датчика в зоне относительно низких температур (рис.1). Использовались пьезоэлементы их керамики ЦТС-19 диаметром 2,5мм, толщиной 1мм. Рабочая частота преобразователей около 600кГц. Для электрического согласования преобразователя с линией связи использовались малогабаритные согласующие трансформаторы с кольцевыми ферритовыми сердечника-

ми. Общая длина датчика 1500мм. Все элементы датчика прикреплены к силовому корпусу, способному выдерживать давление до 25МПа.

Работает датчик следующим образом. Пьезопреобразователи активируются последовательно. При подаче на обкладки преобразователя электрического импульса генерируется акустический сигнал, который по волноводной линии связи в виде продольной волны достигает чувствительного элемента. Вследствие использования Г - образного соединения волновода продольных волн с кольцевым чувствительным элементом в нем возбуждаются две изгибные волны, которые пробегают по кольцу навстречу друг другу, возвращаются в точку соединения, где, суммируясь, преобразуются вновь в продольную волну, которая по волноводу возвращается к преобразователю и генерирует в нем электрический сигнал. Часть энергии акустического сигнала отражается от стыка волновода связи и чувствительного элемента и приходит к преобразователю рань-

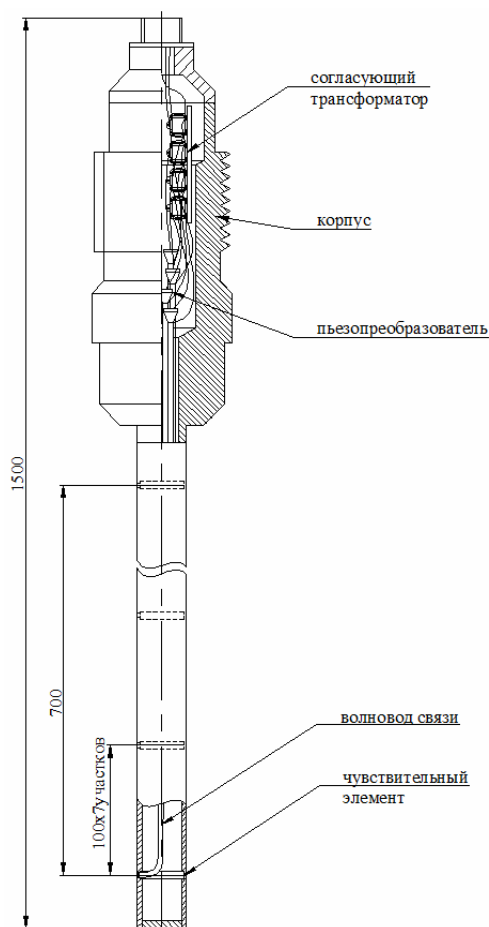


Рис.1. Конструкция сигнализатора уровня с кольцевыми чувствительными элементами.

ше сигнала, пробежавшего по чувствительному элементу. Амплитуда сигнала, прошедшего по чувствительному элементу, зависит от фазового состава окружающей его среды и при погружении его в жидкость уменьшается в несколько раз, вследствие демпфирования.

Электронная схема, размещенная во вторичном блоке прибора, селективирует принятые сигналы по времени при помощи формирователей задержанных строб-импульсов, выделяя прошедшие по чувствительным элементам акустические импульсы, и оценивает их амплитуду при помощи компараторов. При погружении любого чувствительного элемента в жидкость амплитуда принятого сигнала уменьшается ниже заданного уровня дискриминации и триггер вырабатывает сигнал – «жидкость». При осушении чувствительного элемента амплитуда сигнала увеличивается, состояние триггера меняется на противоположное и вырабатывается сигнал – «газ».

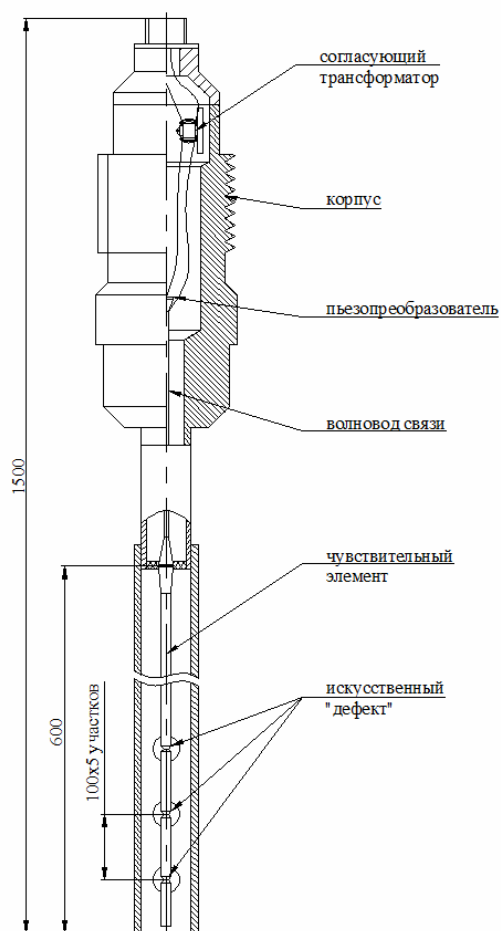


Рис.2. Конструкция сигнализатора уровня со стержневым чувствительным элементом.

Датчик сигнализатора уровня со стержневым чувствительным элементом крутильных волн включает одиночный волноводный чувствительный элемент диаметром 2мм длиной 600мм. На поверхности чувствительного элемента размещены отражатели ультразвука в виде искусственных «дефектов», выполненных в виде пяти насечек, расположенных с шагом 100мм. Для защиты от внешних воздействий чувствительный элемент размещен в перфорированной трубе. Волновод связи, изолированный от контакта с теплоносителем, расположен в защитной чехловой трубе, имеет диаметр 2 мм и в верхней части оснащен пьезопреобразователем крутильных волн на основе пьезокерамики ЦТС-19 (рис.2). Рабочая частота преобразователя крутильных волн – 700кГц. Электрическое согласование преобразователя с линией связи обеспечивает малогабаритный трансформатор с ферритовым сердечником.

Важным качеством крутильных волн нулевого порядка является отсутствие дисперсии, что позволяет получить четкое временное разделение акустических импульсов, отраженных от «дефектов».

Работает сигнализатор следующим образом. При осушенном датчике акустический импульс, сгенерированный пьезопреобразователем, отражается вначале от верхнего «дефекта», затем последовательно от расположенного за ним ниже и т.д. и, наконец, от кончика волновода. В этой же последовательности импульсы принимаются (рис.3). Детектирование импульсов осуществляется

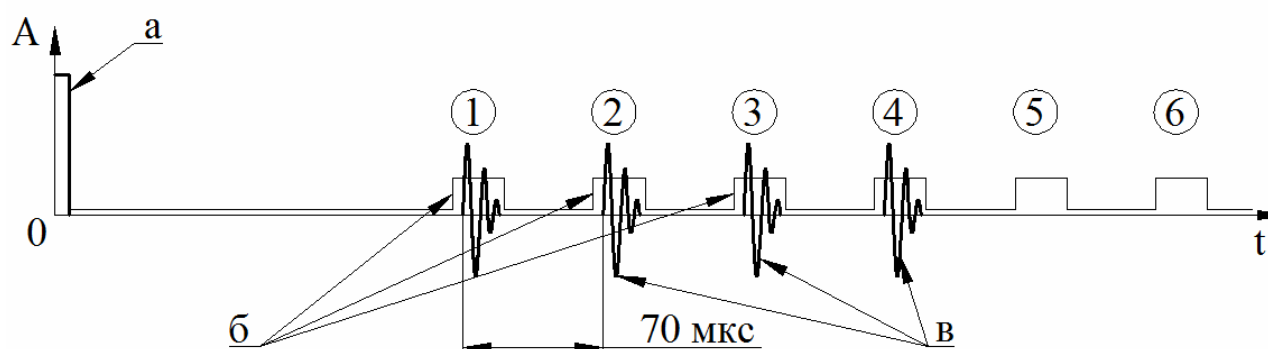


Рис.3. Сигналы с сигнализатора уровня со стержневым чувствительным элементом (1,2,3,4 – принятые импульсы от 4-х искусственных «дефектов», находящихся выше линии раздела фаз – в газовой среде; 5,6 – принятых импульсов нет, т.к. треть чувствительного элемента погружена в жидкость).

а - импульс посылки; б – строб – импульсы; в – принимаемые импульсы (отраженные от «дефектов» на поверхности чувствительного элемента)

при помощи компаратора, активируемого задержанными на заданные интервалы строб-импульсами.

Постепенное погружение чувствительного элемента в жидкость приводит к поглощению энергии импульсов, распространяющихся в чувствительном элементе под уровнем жидкости, и, соответственно, к уменьшению амплитуды сигналов отражения вначале от кончика чувствительного элемента, а затем последовательно и от «дефектов», погружающихся в жидкость, вплоть до их полного исчезновения. Таким образом, увеличение уровня жидкости ведет к тому, что вторичная схема регистрирует вначале исчезновение самого дальнего от импульса посылки принятого сигнала, затем сигнала находящегося перед ним и т.д., отслеживая меняющийся уровень.

При этом при погружении чувствительного элемента в воду при нормальных условиях на 50мм сигнал, отраженный от «дефекта», ослабляется более, чем в 10 раз. (Напомним, что в нашем случае длина каждого участка чувствительного элемента между «дефектами» равна 100мм, что обеспечивает работоспособность системы даже при значительном уменьшении акустического волноводного сопротивления теплоносителя, происходящем с ростом температуры и давления).

## **ИСПЫТАНИЯ СИГНАЛИЗАТОРОВ УРОВНЯ**

Испытания опытных образцов сигнализаторов проводились в стенде ОКБМ, состоящем из модели реактора (МР) интегрального типа с встроенным компенсатором давления; газового баллона объемом около  $0.5\text{м}^3$  для ввода газа (воздуха), буферной емкости объемом около  $2.2\text{м}^3$ , предназначенной для приема пара и теплоносителя в динамических режимах, и информационно-измерительной системы (рис.4).

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 эталонно-

го уровнемера гидростатическим методом по перепаду давления, который определялся при помощи дифманометра «Сапфир-22ДД».

Исследования проводились в «статических» режимах, характеризующихся медленным изменением уровня теплоносителя в контролируемом объеме, и «динамическом» режиме быстрого сброса теплоносителя, имитирующем аварийную ситуацию с потерей теплоносителя. Максимальная скорость изменения давления при этом соответствовала максимальной расчетной скорости изменения давления при аварии с разрывом трубопровода диаметром 48мм.

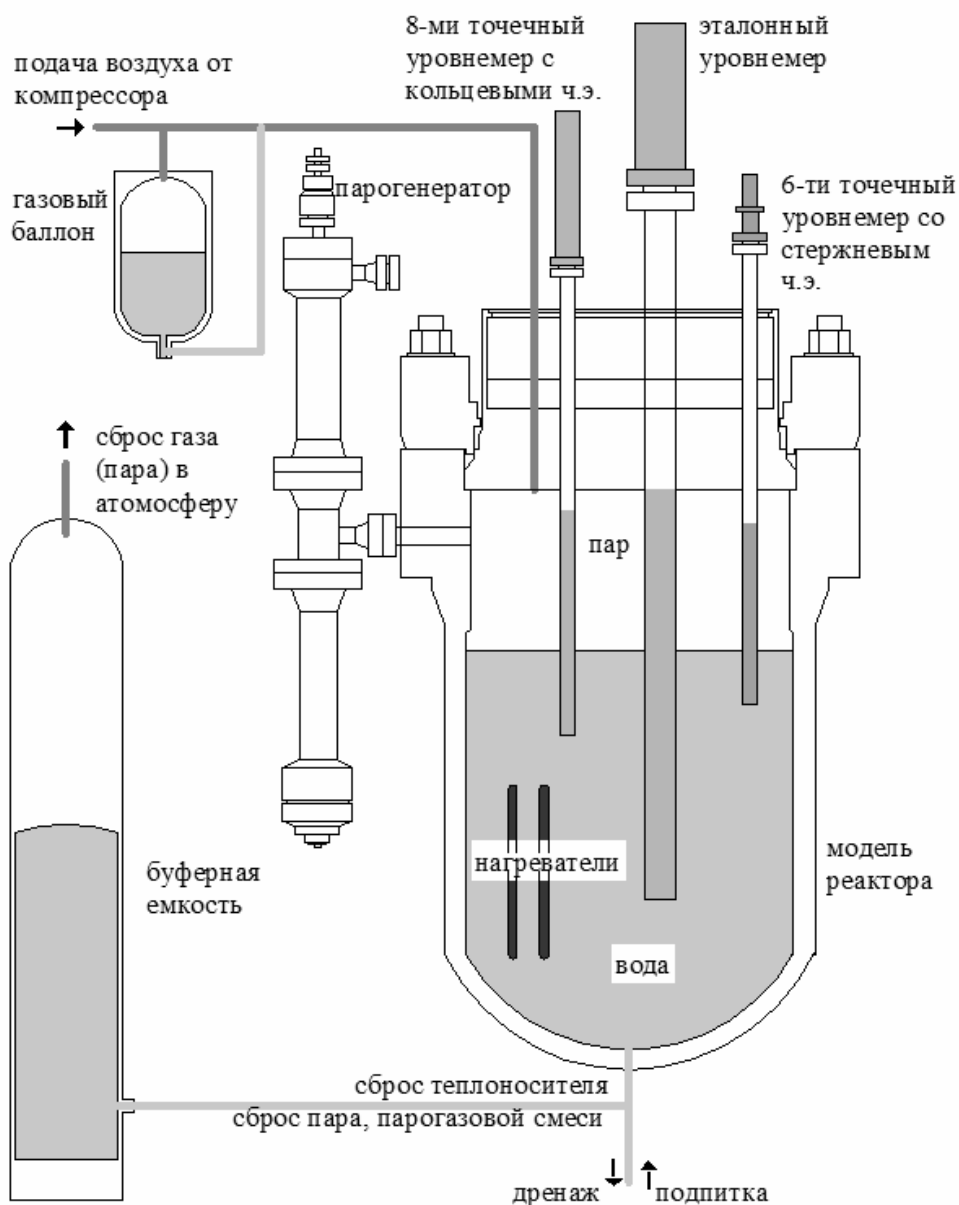


Рис. 4. Стенд для испытаний сигнализаторов уровня

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

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

Температура теплоносителя перед проведением «динамических» режимов составляла  $(345-5)^\circ\text{C}$ , 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, проведения пусконаладочных работ и настройки технических параметров электронных блоков уровнемеров, система 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 давлении.

На рис. 5 приведены показания приборов в процессе заполнения и дренажа воды из модели реактора с остановками на высотах расположения контролируемых объемов зондов акустозондового датчика.

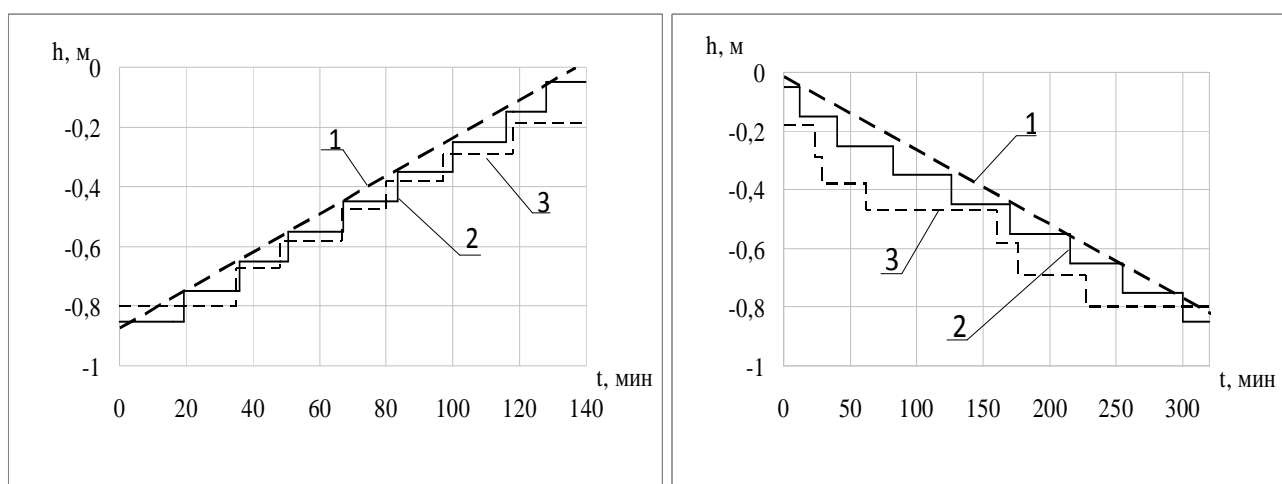


Рис.5. Показания приборов при заполнении и осушении реактора при низких параметрах теплоносителя.

1-эталонный уровнемер; 2-сигнализатор уровня с кольцевыми чувствительными элементами; 3-сигнализатор уровня со стержневым чувствительным элементом.



Показания гидростатического уровнемера корректировались с учетом реального распределения температуры среды в модели реактора по высоте, зафиксированного 26-ти 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.

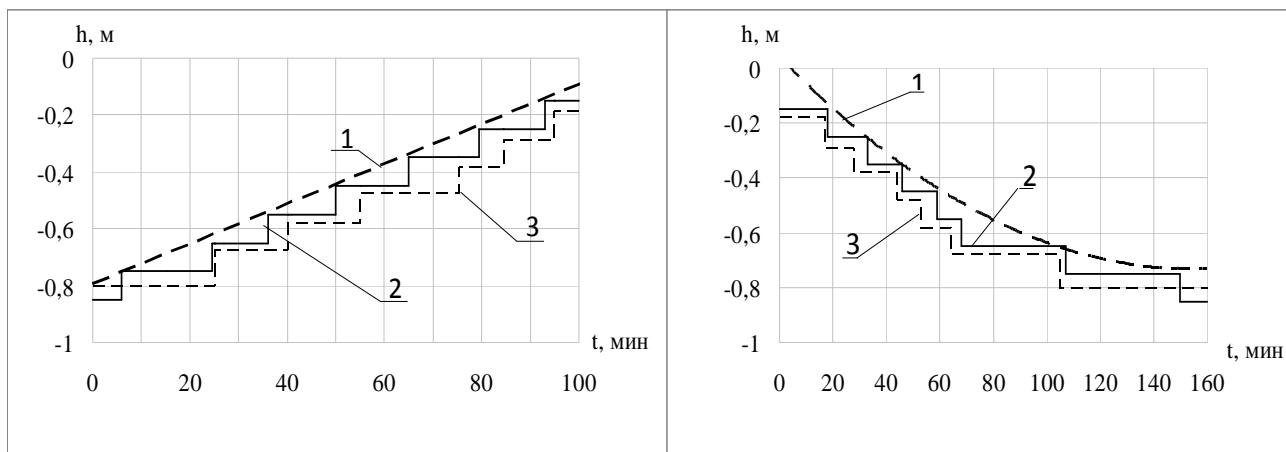


Рис. 6. Показания приборов при заполнении реактора при высоких параметрах теплоносителя и в динамическом режиме при сбросе давления.

1-эталонный уровнемер; 2-сигнализатор уровня с кольцевыми чувствительными элементами; 3-сигнализатор уровня со стержневым чувствительным элементом.

На рис. 6 приведены типичные показания сигнализаторов при плавном увеличении уровня при высоких параметрах теплоносителя и паровой компенсации давления и при сбросе давления, имитирующем аварийную ситуацию с потерей теплоносителя.

Методика проведения эксперимента была следующей. Стенд полностью заполнялся дистиллятом и подключался к буферной емкости, заполненной до отметки уровня около 1 м. С помощью компрессора в системе создавалось давление около 10МПа. За счет внутренних нагревателей стенда теплоноситель разогревался до 342°С. При давлении около 15МПа система стабилизировалась путем дренажа излишней (расширяющейся при нагреве) воды в дренажный бак. После достижения стационарного состояния (342°С и 15МПа) буферная емкость отсекалась и проводился медленный дренаж теплоносителя из модели реактора, сопровождавшийся образованием над уровнем воды паровой подушки.

После достижения теплоносителем отметки уровня 1,6м 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.

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о фактическом совпадении показаний исследуемых сигнализаторов уровня и эталонного уровнемера стенда. Функционирование сигнализаторов уровня в этих режимах вполне удовлетворительно.

На фиксируемый уровень некоторое влияние оказывают пузырьки пара, образующиеся в объеме теплоносителя при его вскипании. Появление пузырьков, а также особенности алгоритма вычисления уровня, приводит к некоторому снижению показаний сигнализатора в аварийных режимах разгерметизации контура относительно режимов без кипения. Следует заметить, что занижение показаний уровнемера в аварийных режимах разгерметизации (относительно эталонного), 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.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Применение кольцевых и стержневых чувствительных элементов (и импедансного принципа измерений) позволяет значительно уменьшить массогабаритные характеристики датчика, а также количество используемых пьезоэлементов по сравнению с акустозондовым сигнализатором [2].

2. Особенностью сигнализатора со стержневым чувствительным элементом является применение единственного волновода для индикации нескольких значений уровня. При этом упрощается кабельное подсоединение датчика, но снижается резервирование.

3. Датчик с кольцевыми чувствительными элементами имеет более прочную конструкцию. В нем вдвое меньше соединительных проводов по сравне-

нию с акустозондовым датчиком. Но имеется ограничение длины чувствительных элементов (оно равно длине окружности чехловой трубы), приводящее к снижению запаса по величине вариации амплитуды сигнала при смене фазового состояния окружающего теплоносителя.

4. Испытания показали, что выбранные конструкции сигнализаторов уровня обеспечивают их надежное функционирование в теплоносителе высоких параметров.

5. Разработанные приборы могут использоваться в экспериментах по изучению процессов в теплофизическом оборудовании, при отработке элементов ядерных энергетических установок, а также в процессе технологических испытаний и при создании новых приборов контроля теплоносителя ЯЭУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. М., Энергоатомиздат, 2006, 351с.
2. В.И. Мельников и др. Исследование акустозондового сигнализатора уровня кипящего водяного теплоносителя// Ядерная энергетика, 2006, №1, с.25-32.
3. В.И. Мельников и др. Исследование акустозондовых сигнализаторов уровня теплоносителя в интегральном стенде КВ-2// Ядерная энергетика, 2013, №1, с.43-47.
4. В.И. Мельников Волноводные акустоимпедансные уровнемеры и сигнализаторы жидкости// Датчики и системы, 2011, №12, с.6-10.

## Сведения об авторах:

Мельников Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.

Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-902-780-49-92, [melnikov@nntu.nnov.ru](mailto:melnikov@nntu.nnov.ru),  
[www.aisnn.com](http://www.aisnn.com)

Иванов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.

Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-920-299-88-43, [ivv@nntu.nnov.ru](mailto:ivv@nntu.nnov.ru)

Тепляшин Иван Алексеевич, аспирант кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, моб. 8-904-044-18-94, [ivantia@mail.ru](mailto:ivantia@mail.ru)

Киселев Юрий Александрович, ведущий инженер-конструктор ОАО «ОКБМ Африкантов». Тел. 8-(831) 275-26-45.

Синицын Александр Назарович, ведущий инженер-испытатель ОАО «ОКБМ Африкантов». Тел. 8-(831) 270-43-60.

Белин Алексей Владимирович, начальник службы СУЗ, ОАО «ОКБМ Африкантов». Тел. 8-(831) 241-35-02.

## ABSTRACT

# **Study of advanced acoustic waveguide level sensors of water coolant on NPP**

V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, I.A. Tepljashin, Y.A. Kiselev,  
A.N. Sinitsin, A.V. Belin

The operation principles of multipoint acoustic liquid level sensors relative to impedance type using waveguides of bending and torsion waves were investigated. The constructions with the ring and rod sensitive components were discussed to control the water coolant level in nuclear reactor. The results of unit testing of the experimental level sensors in the conditions close by real situation were presented/

*Key words: liquid level sensor, acoustic waveguide, bending and torsion waves, piezoconverter, nuclear reactor/*