

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО ВОЛНОВОДНОГО УРОВНЕМЕРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В.И. Мельников, И.А. Тепляшин, В.В. Иванов

*Нижегородский государственный технический университет
603600, Н. Новгород, ул. Минина, 24, НГТУ им. Р.Е. Алексеева*



Рассмотрены результаты экспериментального исследования работы ультразвукового рефлекс-радарного волноводного уровнемера в водяном теплоносителе высоких параметров при давлении до 18 МПа и температуре до 350°C.

В отличие от известных волноводных уровнемеров в нем измеряется время пробега акустических импульсов по волноводному тракту от излучателя до приповерхностного слоя и обратно. Волноводный тракт состоит из двух акустически изолированных волноводов – излучающего и приемного. Используются волноводы изгибных волн нулевого порядка и пьезоэлектрические преобразователи, работающие на частоте ~ 800 кГц. Обработка принимаемых сигналов осуществляется электронной схемой на основе микропроцессора. Погрешность измерений не превышает ±10 мм. Приведены описание экспериментального стенда и методика проведения опытов.

Прибор стабильно работает и не нуждается в коррекции показаний при изменении теплофизических свойств теплоносителя. Он предназначен для применения в теплообменном оборудовании тепловой и атомной энергетики.

Ключевые слова: ультразвуковой рефлекс-радарный волноводный уровнемер, акустический волновод, пьезопреобразователь, водяной теплоноситель высоких параметров (350°C, 18 МПа), ЯЭУ, энергетическое оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

Приборы контроля уровня теплоносителя являются важнейшими компонентами систем управления и безопасности ядерной энергетической установки (ЯЭУ).

Ввиду того, что параметры теплоносителя фактически являются экстремальными (температура до 350°C, давление до 18 МПа при высоком уровне радиации), измерение уровня является сложной технической задачей.

Предложено множество технических решений и идей для решения этой проблемы, но лишь их малая часть была осуществлена в виде реальных конструкций и еще меньше были опробованы на практике.

По нашему мнению, наиболее подходящими для решения задачи контроля уровня водяного теплоносителя в реакторных установках являются акустические приборы, основанные на использовании металлических волноводов. Их применение

© В.И. Мельников, И.А. Тепляшин, В.В. Иванов, 2015

позволяет создавать датчики со значительным ресурсом, способными проводить измерения практически безынерционно и работать в экстремальных условиях ядерной установки продолжительное время.

Существует два принципиально отличающихся друг от друга варианта построения измерительной системы: первый – это уровнемеры в виде многоточечных сигнализаторов жидкости дискретного действия; второй – уровнемеры, позволяющие вести непрерывный контроль уровня теплоносителя.

Первый вариант реализуется на основе системы, включающей в себя несколько десятков волноводов, каждый из которых снабжен пьезопреобразователем и подключен к чувствительному элементу [1]. В результате получается многокомпонентная сложная и дорогостоящая конструкция, которая должна быть дополнена соответствующей электроникой и многожильным соединительным кабелем. Преимуществом многоточечных сигнализаторов является отсутствие необходимости метрологической аттестации прибора.

Второй вариант – это акустоимпедансные уровнемеры, основанные на измерении затухания (или задержки) акустических импульсов, распространяющихся по протяженному волноводу, при погружении его в жидкость [2, 3]. Отличием акустоимпедансных уровнемеров от многоточечных сигнализаторов уровня является их относительная простота, а следовательно, большая надежность и низкая стоимость. Существенным недостатком этих приборов является влияние на выходной сигнал изменения физических свойств контролируемой среды при изменениях ее температуры и давления. Для устранения такого влияния требуется дополнительная коррекция данных. Возможны также влияния конденсата, стекающего по волноводному чувствительному элементу выше линии раздела фаз, и кипения, приводящего к выделению парогазовых пузырей в жидкой фазе.

Указанные недостатки обусловлены методикой измерений, основанной на определении амплитуды принятого сигнала, на которую оказывают влияние различные факторы от изменения сопротивления в линии связи до старения элементов волновода. Значительное улучшение качества прибора можно ожидать при замене амплитудных измерений акустических сигналов на временные.

В работе приводятся описание впервые разработанной конструкции ультразвукового рефлекс-радарного уровнемера и результаты его экспериментальных исследований в условиях, максимально приближенных к реальным при широком изменении параметров контролируемой среды – водяного теплоносителя высоких параметров.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО УРОВНЕМЕРА

Основная идея рефлекс-радарных уровнемеров заключается в лоцировании границы раздела сред жидкость-газ. Передача энергии осуществляется в импульсном режиме по волноводу, а измеряемой величиной является время пробега импульсов от послышки до приема. Такой принцип измерений осуществляется в сверхвысокочастотных рефлекс-радарных уровнемерах, где используются импульсы СВЧ-энергии, распространяющиеся по СВЧ-волноводу. Однако применение таких уровнемеров в атомной энергетике наталкивается на существенные трудности, связанные со сложностью установки СВЧ-аппаратуры внутри оборудования первого контура.

Попытки применить рефлекс-радарную технологию на основе ультразвуковых волноводов предпринимались в нашей стране в 70-х годах прошлого века, но не увенчались успехом [4, 5].

Очевидные преимущества волноводных уровнемеров с измерительным каналом на основе временных измерений заставили вновь вернуться к этой идее. Поэтому

были предприняты усилия по созданию рефлекс-радарного уровнемера с использованием ультразвуковых волноводов и импульсных сигналов.

В предложенном техническом решении, в отличие от предлагаемых ранее, используются два волновода изгибных волн (как наиболее эффективных излучателей): один – излучатель ультразвуковых импульсов, второй – приемник. Волноводы расположены вертикально параллельно друг другу. Вдоль волноводов по всей их длине установлен полуцилиндрический рефлектор с множеством отражателей в виде гофров сифона, разрезанного вдоль по длине. Передача акустической энергии от волновода к волноводу может происходить только при заполнении жидкостью пространства между волноводами и рефлектором. На рисунке 1 показана схема передачи ультразвуковой волны от излучающего волновода к ближайшему под уровнем жидкости отражателю рефлектора и далее к приемному волноводу.

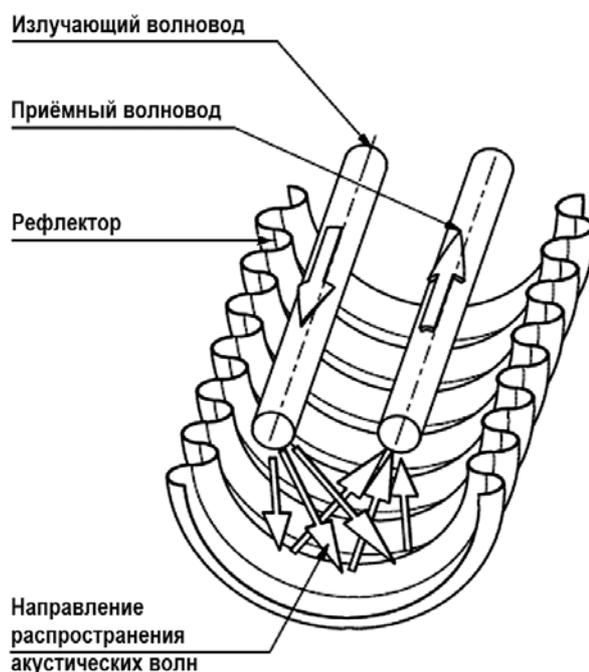


Рис. 1. Схема распространения ультразвуковой волны от излучающего волновода к приемному

Благодаря физическим свойствам изгибных волн нулевого порядка при их распространении по волноводу, погруженному в жидкость, происходит эффективное излучение акустической энергии в жидкость. При этом, например, при диаметре волновода 2 мм на частоте 800 кГц практически полная передача энергии изгибной волны в жидкость достигается при контактировании волновода с жидкостью на длине всего 30 – 50 мм.

Поэтому передача акустической энергии от излучающего волновода в жидкость к отражателю и далее к приемному волноводу происходит в приповерхностном слое глубиной 20 – 30 мм. Акустическая волна от излучающего волновода в приповерхностном слое жидкости падает под углом вниз на рефлектор. Затем, переотражаясь от его горизонтально ориентированных выступов, возвращается под тем же углом вверх, к приемному волноводу, формируя сигнал на приемном пьезопреобразователе. Уровень жидкости пропорционален времени пробега ультразвуковых импульсов по волноводу до приповерхностного слоя жидкости и обратно, т.е. определяется по временной характеристике сигнала по рефлекс-радарному принципу.

Излучение волны в жидкость происходит под углом φ , определяемым треугольником скоростей звука: изгибающей волны в волноводе и продольной волны в жидкости [1]. Для многих жидкостей (в том числе и воды) угол входа волны в жидкость примерно равен 60° относительно оси волновода. Вследствие поляризованности изгибающих волн в волноводе в жидкости формируется диаграмма направленности, состоящая из двух пучков волн, симметричных относительно оси волновода, в плоскости колебаний. В связи с этим волноводы следует ориентировать так, чтобы получить максимальную амплитуду принимаемых сигналов, отраженных от поверхности рефлектора.

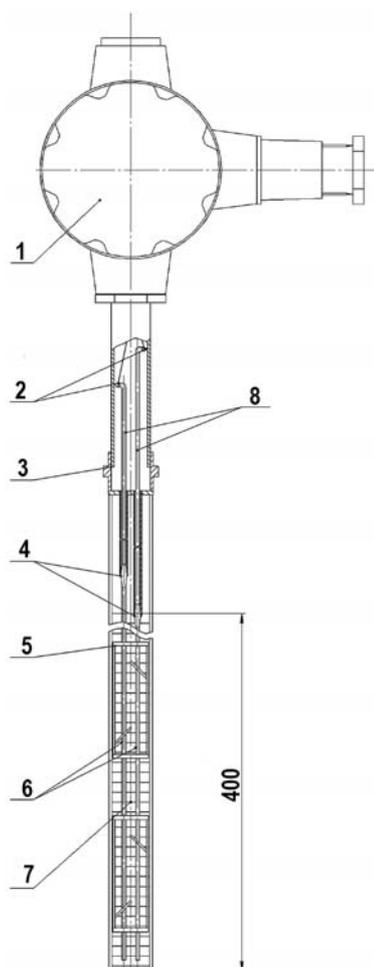


Рис. 2. Конструкция рефлекс-радарного уровнемера: 1 – электронный блок; 2 – пьезопреобразователь; 3 – подвеска; 4 – узлы уплотнения; 5 – крепление волноводов; 6 – излучающий и приемный волноводы; 7 – рефлектор; 8 – волноводы связи

Конструкция уровнемера включает в себя два волновода изгибающих волн в виде стержней диаметром 2 мм и длиной 400 мм, прикрепленных через узлы уплотнения к волноводам связи, снабженных пьезопреобразователями изгибающих волн с рабочей частотой около 800 кГц; полуцилиндрический рефлектор, изготовленный из гофрированной стальной трубы диаметром 16 мм, и электронный блок (рис. 2). Подвеска частей прибора содержит узел уплотнения в виде штуцера с накидной гайкой, скоб крепления волноводов и стойку для крепления корпуса с электронными компонентами.

Функциональная схема обработки сигналов датчика (рис. 3) состоит из генератора видеоимпульсов, усилителя принятых сигналов, компаратора, измерителя временных интервалов, цифроаналогового преобразователя и генератора тока. Основные элементы схемы выполнены на основе микропроцессора. Предусмотрена возможность наблюдения принимаемых сигналов при помощи осциллографа. Схема обеспечивает вывод токового сигнала, линейно связанного со временем пробега ультразвуковых импульсов от излучателя до ближайшего отражателя рефлятора, находящегося под уровнем жидкости, к приемнику. Процессор выполняет функции стробирования, вычислителя и нормировки выходного сигнала.

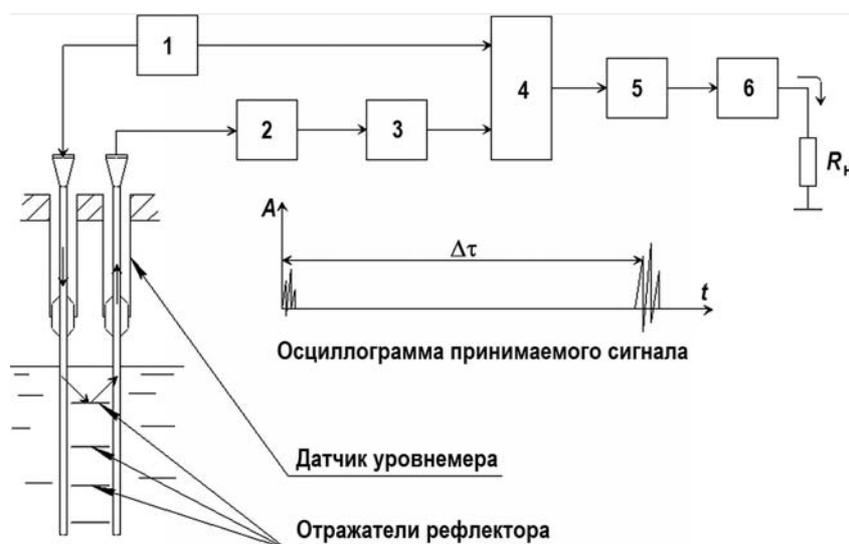


Рис. 3. Функциональная схема электронной части уровнемера: 1 – генератор видеоимпульсов; 2 – усилитель; 3 – компаратор; 4 – измеритель временных интервалов; 5 – ЦАП; 6 – генератор тока

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Калибровка прибора выполнялась при нормальных условиях путем плавного погружения чувствительного элемента датчика в воду. При этом выходной ток изменялся пропорционально глубине погружения его в жидкость. Среднеквадратичное отклонение измеренного уровня от линии тренда не превышало 4 мм, что можно объяснить шагом гофров использованного рефлятора, равным примерно 4,5 мм.

Опыты при повышенных параметрах проводились в водном теплоносителе на линии насыщения в диапазоне давления от 0,1 до 18 МПа. Экспериментальная установка (рис. 4) представляет собой прочную герметично закрытую трубу с электрообогревом, в которую помещается уровнемер. Использовалась труба из нержавеющей стали длиной 700 мм и внутренним диаметром 35 мм. Нагревательный элемент в виде спирали из нихрома с фарфоровыми изоляторами намотан на трубу и снаружи защищен теплоизоляцией на основе базальтовой ваты. Температура и давление воды внутри трубы контролируются. Мощность нагревателя регулируется при помощи лабораторного автотрансформатора. Максимальная температура теплоносителя может достигать 357°C.

Амплитуда принимаемого сигнала, от которого в значительной степени зависит надежность работы прибора, линейно связана с волновым сопротивлением воды. Зависимость волнового сопротивления воды от давления на линии насыщения в измеряемом диапазоне давлений приведена на рис. 5. Отметим, что волновое сопротивление в указанном диапазоне давления уменьшается почти в пять раз.

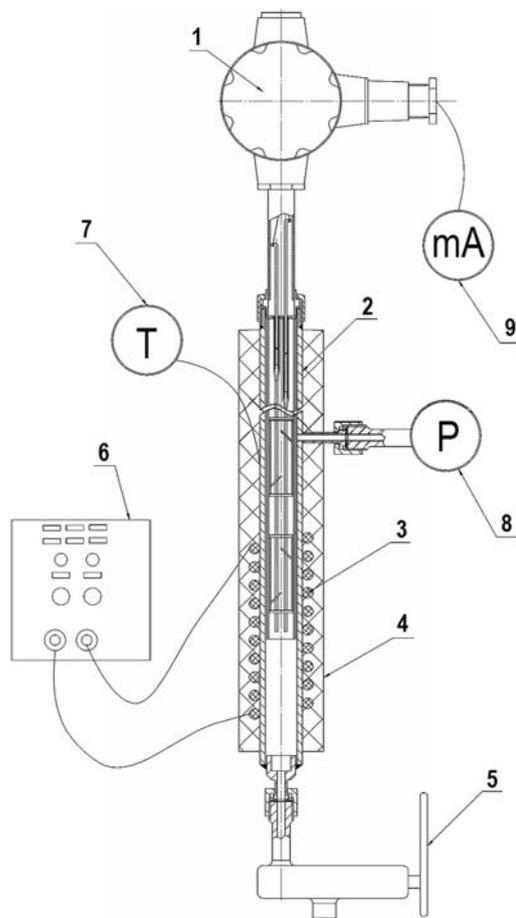


Рис. 4. Экспериментальная установка: 1 – электронный блок; 2 – труба; 3 – нагревательный элемент; 4 – теплоизоляция; 5 – вентиль слива; 6 – автотрансформатор; 7 – термодатчик; 8 – манометр; 9 – измеритель тока

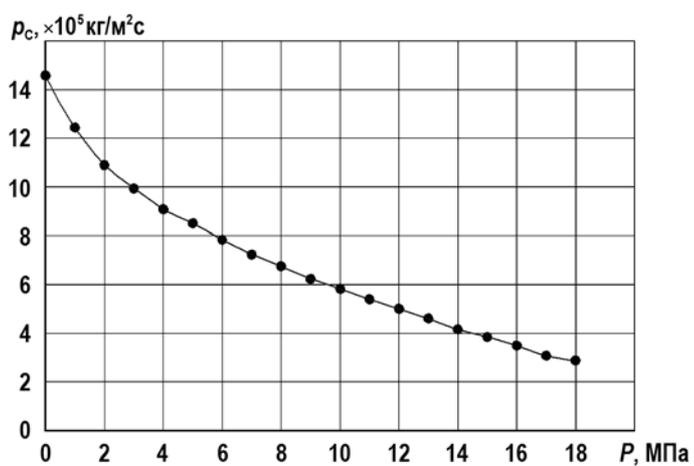


Рис. 5. Зависимость волнового сопротивления воды от давления на линии насыщения

В процессе разогрева внутри герметично закрытого экспериментального участка происходит кипение и частичное испарение воды, а повышающееся давление бло-

кирует развитие кипения. Таким образом, наблюдается изохорический термодинамический процесс на линии насыщения воды (при постоянном объеме). При этом с ростом температуры и давления уровень воды постепенно увеличивается. Была определена ожидаемая расчетная зависимость изменения уровня воды от давления на линии насыщения (давление однозначно связано с температурой насыщения), показанная на рис. 6. Расчеты проводились по формуле

$$h = m / (\pi r^2 \rho'), \quad (1)$$

где h – физический уровень воды в трубе экспериментального участка; m – масса воды в трубе экспериментального участка; r – внутренний радиус трубы; ρ' – плотность воды на линии насыщения.

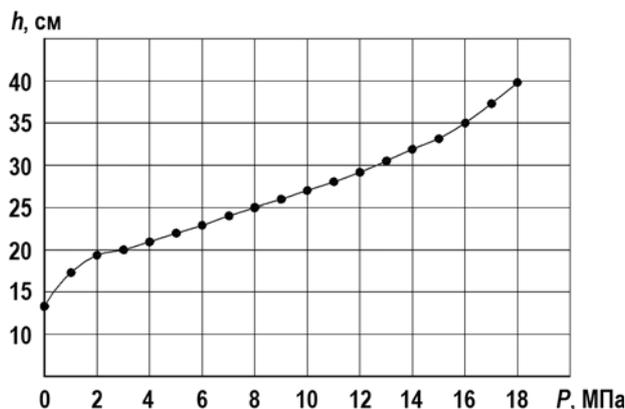


Рис. 6. Расчетная зависимость изменения уровня теплоносителя в установке от давления насыщения воды

Перед проведением эксперимента система заполняется водой до отметки 450 мм от нижнего конца трубы, затем устанавливается уровнемер (чувствительный элемент датчика погружается в жидкость на глубину 130 мм) и выполняется герметизация системы. После подготовки измерительной схемы на электрообогреватель мощностью ~ 400 Вт подается питание. Температура в системе плавно повышается со скоростью около 7°C/мин и доводится до значения ~ 350°C. При этом давление повышается примерно до 18 МПа. Контролируются температура и давление теплоносителя внутри трубы, а также акустические сигналы и выходной ток уровнемера.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе экспериментов была найдена зависимость измеренного уровня теплоносителя от расчетного на линии насыщения (рис. 7).

Полученное расхождение уровня, измеренным рефлекс-радарным уровнемером теплоносителя, с фактическим находится в пределах ± 10 мм, т.е. их совпадение является вполне удовлетворительным. В таком случае во всем диапазоне изменения параметров теплоносителя как первого, так и второго контуров в коррекции показаний уровнемера нет необходимости.

Отметим, что в процессе проведения опытов наблюдались флуктуации принимаемого акустического сигнала, обусловленные, по нашему мнению, кипением среды. Для проверки этого предположения производилось временное отключение подогрева, приводившее к исчезновению колебаний принимаемых сигналов.

Наиболее сильные флуктуации сигнала наблюдаются при давлении выше 14 МПа. Однако выбранный нами алгоритм позволил в значительной мере устранить влияние флуктуаций на выходной сигнал прибора. Особенностью этого алгоритма является использование методов математической статистики для локализации максималь-

ной амплитуды принимаемого сигнала в контролируемом временном интервале, что позволяет определять наиболее вероятное время пробега ультразвуковых сигналов по акустическому тракту прибора.

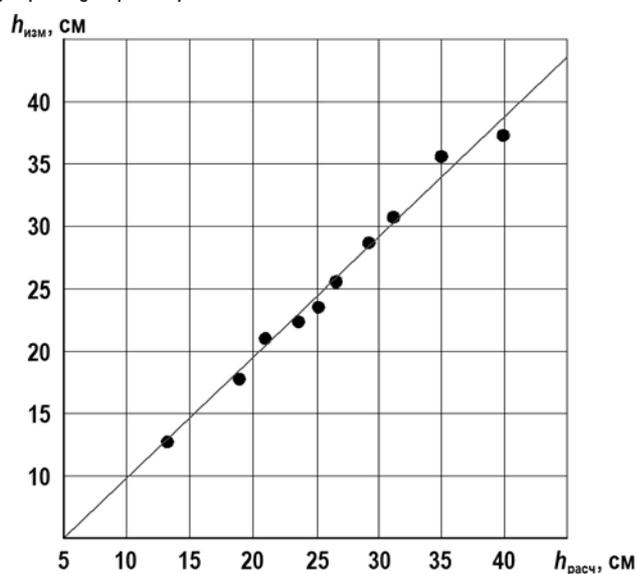


Рис. 7. Зависимость измеренного уровня воды от расчетного на линии насыщения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен разработанный впервые ультразвуковой уровнемер, основанный на рефлекс-радарном принципе измерений и приспособленный к использованию в оборудовании энергетических установок. Особенностью прибора является то, что измеряемой величиной является временная характеристика, а именно, время пробега ультразвуковых импульсов по волноводу от излучателя до линии раздела вода-пар и обратно к приемнику по второму волноводу. Отметим, что измерение временных интервалов производится проще и, главное, надежнее, чем измерение амплитуды сигналов. При этом изменяющиеся в широком диапазоне параметры теплоносителя не оказывают существенного влияния на работу прибора.

Важной особенностью уровнемера является то, что в нем излучатель и приемник вынесены из зоны воздействия высокой температуры и давления и связаны с контролируемой средой металлическими волноводами, что значительно увеличивает срок его службы и уменьшает стоимость.

Рассмотренный уровнемер изготовлен в виде законченного прибора, эскиз которого показан на рис.8.

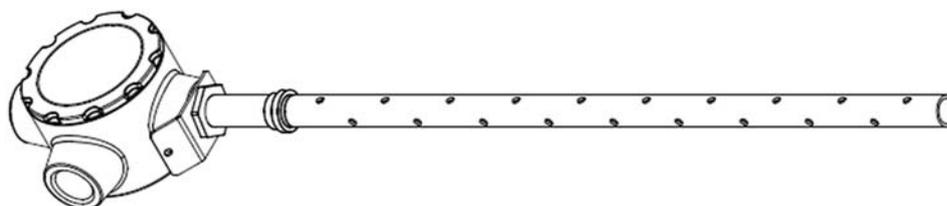


Рис. 8. Внешний вид рефлекс-радарного ультразвукового уровнемера с интегрированным электронным блоком

Литература

1. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. М.: Энергоатомиздат. 2006. 351с.

2. Мельников В.И. Волноводные акустоимпедансные уровнемеры и сигнализаторы жидкости // Датчики и системы. - 2011. - №12. - С. 6 - 10.

3. Мельников В.И., Иванов В.В., Тепляшин И.А., Киселев Ю.А., Сеницын А.Н., Белин А.В. Исследование перспективных волноводных акустических сигнализаторов уровня водяного теплоносителя ЯЭУ // Датчики и системы. - 2013. - № 11. - С. 11-17.

4. Дюдин Б.В., Лепендин Л.Ф., Павлюк В.П., Плутенко А.Д., Фирсов Н.П. Ультразвуковой уровнемер для жидкости. Авторское свидетельство РФ № 322638. Опубл. 30.11.1971. Бюлл. № 36.

5. Дюдин Б.В. Датчик ультразвукового импульсного уровнемера. Авторское свидетельство РФ № 510648. Опубл. 15.04.1976. Бюлл. № 14.

Поступила в редакцию 26.10.2015 г.

Авторы

Мельников Владимир Иванович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: melnikov@nntu.nnov.ru, www.aisnn.com

Иванов Вадим Владимирович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: ivv@nntu.nnov.ru

Тепляшин Иван Алексеевич, аспирант

E-mail: ivantia@mail.ru

UDC 621.121

THE STUDY OF ULTRASONIC REFLEX-RADAR WAVEGUIDE COOLANT LEVEL GAGE FOR A NUCLEAR REACTOR

Meľnikov V. I., Ivanov V. V., Teplyashin I. A.

Nizhnij Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
24 Minin st., Nizhnij Novgorod, 603600 Russia

ABSTRACT

The results of the experimental study of ultrasonic level gage on the basis of reflex-radar principles have been discussed. It has been shown that the device operated stably at high temperatures and pressure up to 18 MPa into the water coolant.

The measurable parameter is the running time of acoustic impulses from an emitter to near the surface of coolant and the time of return movement in contrast to well-known waveguide level gages which measure the amplitude of signals.

The waveguide channel consists of two the acoustic insulation waveguides: the emitting and receiver waveguides. The waveguides by zero-order of bending waves and a piezoelectric transducer which work at the frequency about 800 kHz are used. The data processing of receiving signals implements by the electronic scheme on the base of the microprocessor. The accuracy of measurements didn't more than ± 10 mm. The description of the testing unit and methods of the experiment realization was given.

The level gage does not require the correction of signal aspects when the thermo physical properties of the coolant were changed. The device is reserved for the use in heat exchange equipment of the thermal and nuclear energetic.

Key words: ultrasonic waveguide level, reflex-radar principles, acoustic waveguide, a piezoelectric transducer, water coolant of high parameters (350°C, 18 MPa), nuclear power reactor, power equipment.

REFERENCES

1. Mel'nikov V.I., Drobkov V.P., Kontelyov V.V. Akusticheskie metody diagnostiki gazozhidkostnyh potokov [Acoustic methods of diagnosis of gas-liquid flows]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 2006, 351 p. (in Russian).
2. Mel'nikov V.I. Volnovodnye acustoimpedansnye urovnemery i signalizatory zhidkosti [The acoustic impedance waveguide level meter and signaling devices for liquid] Nizhniy Novgorod. *Datchiki i Sistemy*. 2011, no. 12, pp. 6-10 (in Russian).
3. Mel'nikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A., Kiselev Y.A., Sinichin A. N., Belin A. V. Issledovanie perspektivnyh volnovodnyh akusticheskikh signalizatorov urovnya vodyanogo teplonositelya YaEU [Study of advanced acoustic waveguide level sensors of water coolant on NPP] Nizhniy Novgorod, *Datchiki i Sistemy*. 2013, no. 11, pp. 11-17 (in Russian).
4. Djudin B.V., Lependin L.F., Pavluk V.P., Plutenko A.D., Firsov N.P. Ultrazvukovoj urovnemer dlya zhidkosti [Ultrasonik levelmeter for liquid]. Avtorskoe svidetel'stvo RF № 322638. Publ. 30.11.1971. Bulletin № 36 (in Russian).
5. Djudin B.V. Datchik ultrazvukovogo impulsnogo urovnemera [Devices ultrasonic pulse level meter]. Avtorskoe svidetel'stvo RF № 510648. Publ. 15.04.1976. Bulletin № 14 (in Russian).

Authors

Mel'nikov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: melnikov@nntu.nnov.ru.

Ivanov Vadim Vladimirovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ivv@nntu.nnov.ru

Teplyashin Ivan Alekseevich, PhD Student

E-mail: ivantia@mail.ru