

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО ВОЛНОВОДНОГО УРОВНЕМЕРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯЭУ

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

Рассмотрены результаты экспериментального исследования работы ультразвукового рефлекс-радарного волноводного уровнемера в водяном теплоносителе высоких параметров при давлении до 18МПа и температуре до 350⁰С. Показано, что прибор устойчиво функционирует в данных условиях. Уровеньмер не нуждается в коррекции показаний при изменении теплофизических свойств теплоносителя. Прибор предназначен для применения в теплообменном оборудовании тепловой и атомной энергетики.

Ключевые слова: ультразвуковой рефлекс-радарный волноводный уровнемер, акустический волновод, пьезопреобразователь, водяной теплоноситель высоких параметров, 350⁰С, 18МПа, ЯЭУ, энергетическое оборудование.

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 350⁰С, давление до 18МПа 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 позволяет создавать датчики со значительным ресурсом, способными проводить измерения практически безинерционно 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 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. Вместе с тем, существенным недостатком этих приборов является влияние на выходной сигнал изменения физических свойств контролируемой среды при вариации ее температуры и давления, требующего внесения коррекции. Также, возможно влияние 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 данной работе приведено 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.

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 посылки до приема. Такой принцип измерений осуществляется в СВЧ рефлекс-радарных уровнемерах, где используются импульсы СВЧ энергии, распространяющиеся по СВЧ волноводу. Однако применение таких уровнемеров в атомной энергетике наталкиваются на существенные трудности, связанные со сложностью проводки СВЧ энергии внутрь 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 нас вновь вернуться к этой идее. Поэтому нами 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 изгибаемых волн (как наиболее эффектив-

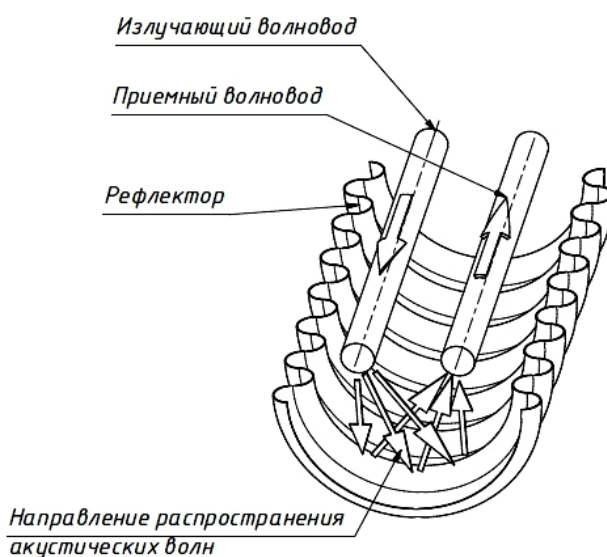


Рис. 1. Схема распространения ультразвуковой волны от излучающего волновода к приемному.

ных излучателей): один в качестве излучателя ультразвуковых импульсов, второй - в качестве приемника. Волноводы расположены вертикально параллельно друг другу. Вдоль волноводов по всей их длине установлен полуцилиндрический рефлектор с множеством отражателей в виде гофр сильфона, разрезанного вдоль по своей длине. Передача акустической энергии от волновода к волноводу может происходить только при заполнении жидкостью пространства между волноводами и рефлектором. На рис.1 показана схема передачи ультразвуковой волны от излучающего волновода к ближайшему под уровнем жидкости отражателю рефлектора и далее к приемному волноводу.

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 2мм на частоте 800кГц практически полная передача энергии изгибной волны в жидкость достигается при контактировании волновода с жидкостью на длине всего 30-50мм.

Поэтому передача акустической энергии от излучающего волновода в жидкость к отражателю и далее к приемному волноводу происходит в приповерхностном слое жидкости глубиной 20-30мм. 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, то есть определяется по временной характеристике сигнала, по рефлекс-радарному принципу.

Излучение волны в жидкость происходит под углом φ , определяемым треугольником скоростей звука: изгибной волны в волноводе и продольной волны в жидкости [1]. Для распространенных жидкостей (вода, нефтепродукты) угол входа волны в жидкость примерно равен 60^0 относительно оси вол-

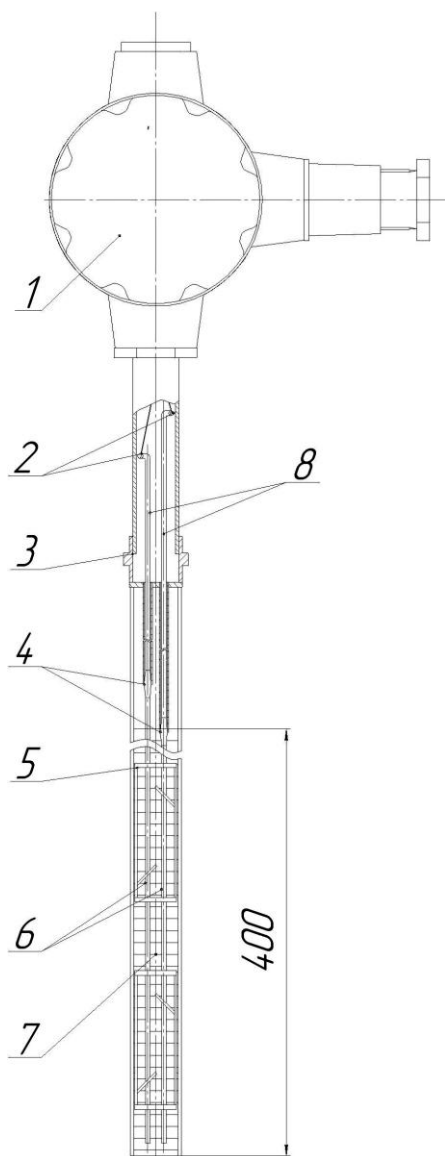


Рис.2. Конструкция рефлекс-
радарного уровнемера.
1-электронный блок, 2-
пьезопреобразователь, 3-
подвеска, 4-узлы уплотнения, 5-
крепление волноводов, 6-
излучающий и приемный вол-
новоды, 7- рефlector, 8-
волноводы связи

новода. Вследствие поляризованности изгиб-
ных 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 таким
образом, чтобы получить максимальную ам-
плитуду принимаемых сигналов, отраженных
от поверхности рефлктора

Конструкция уровнемера включает два
волновода изгибных волн в виде стержней
диаметром 2мм и длиной 400мм, прикреплен-
ных через узлы уплотнения к волноводам свя-
зи, снабженных пьезопреобразователями из-
гибных волн с рабочей частотой около 800кГц,
полуцилиндрический рефлктор, изготовлен-
ный из гофрированной стальной трубы диамет-
ром 16мм, и электронный блок (рис.2). Подвес-
ка частей прибора содержит узел уплотнения в
виде штуцера с накидной гайкой, скоб крепле-
ния волноводов и стойку для крепления корпу-
са с электронными компонентами.

Функциональная схема обработки сигналов датчика приведена на рис.3. Она состоит из генератора видеоимпульсов, усилителя принятых сигналов, компаратора, измерителя временных интервалов, цифро-аналогового преобразователя и генератора тока. Основные элементы схемы выполнены на основе микропроцессора. Предусмотрена возможность наблюдения прини-

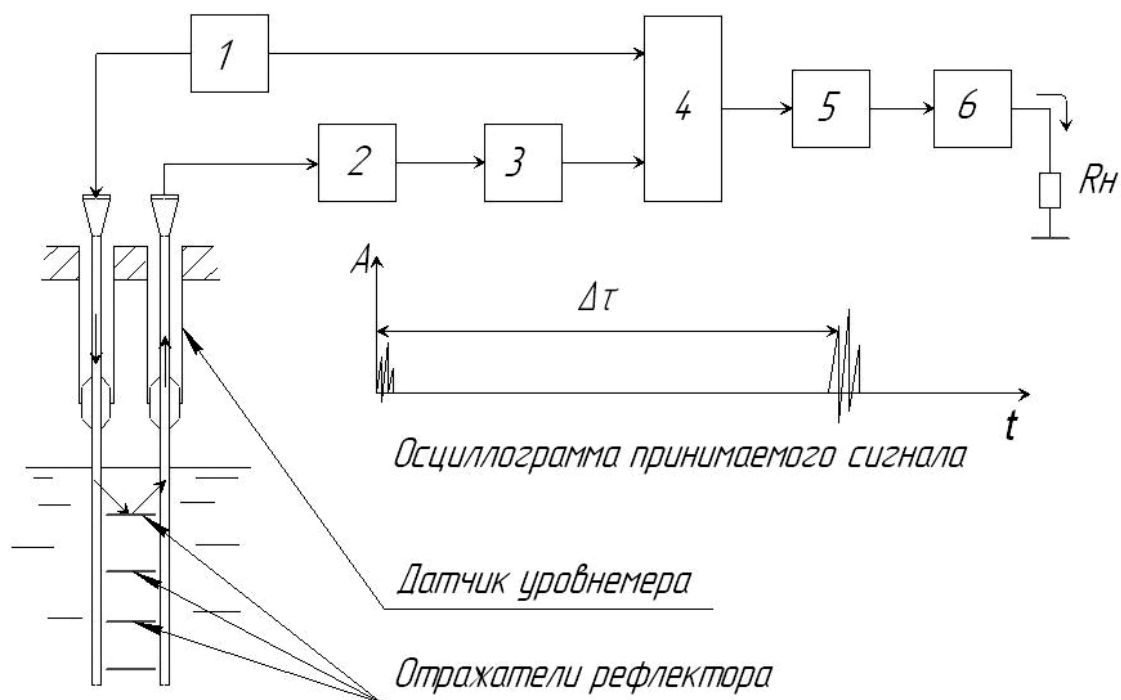


Рис.3. Функциональная схема электронной части уровнемера.
1-генератор видеоимпульсов, 2-усилитель, 3-компаратор, 4-измеритель временных интервалов, 5-ЦАП, 6-генератор тока.

маемых сигналов при помощи осциллографа. Схема обеспечивает вывод токового сигнала, линейно связанного с временем пробега ультразвуковых импульсов от излучателя до ближайшего отражателя рефлектора, находящегося под уровнем жидкости, к приемнику. Процессор выполняет функции стробирования, вычислителя и нормировки выходного сигнала.

Калибровка прибора была выполнена при нормальных условиях, путем плавного погружения чувствительного элемента датчика в воду, при этом подтвердилось, что выходной ток изменяется пропорционально глубине погружения его в жидкость.

Опыты при повышенных параметрах проводились в водном теплоносителе на линии насыщения при вариации давления от 0,1 до 18 МПа. Экспе-

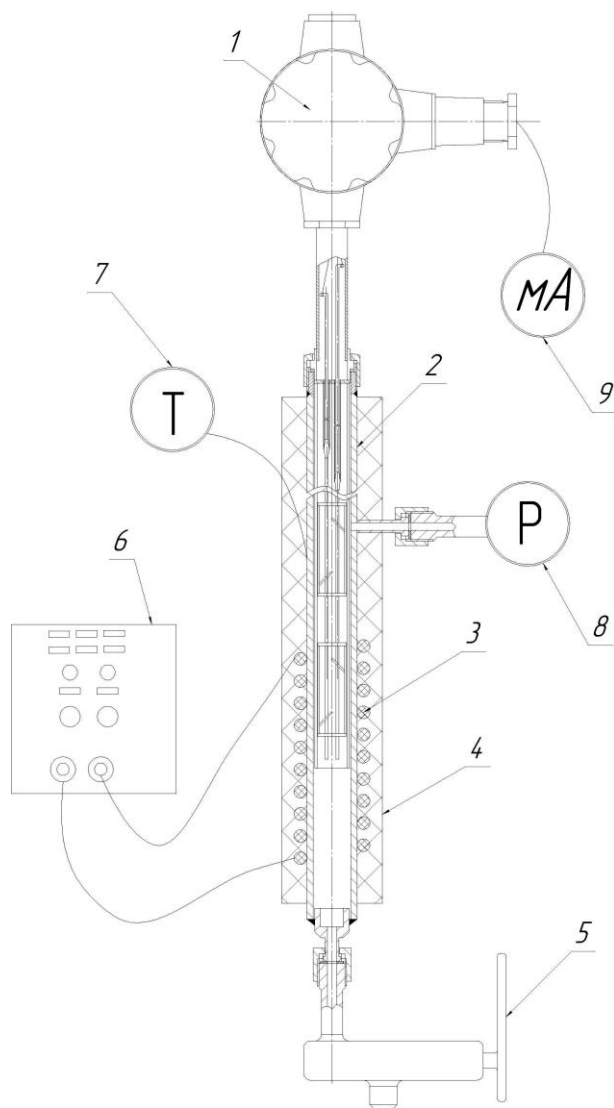


Рис.4. Экспериментальная установка

1-электронный блок, 2-труба, 3-нагревательный элемент, 4-теплоизоляция, 5-вентиль слива, 6-автотрансформатор, 7-термодатчик, 8-манометр, 9-измеритель тока.

риментальная установка представляла собой прочную герметично закрытую трубу с электрообогревом, в которую помещался уровнемер (рис.4). Использовалась труба из нержавеющей стали длиной 700мм и внутренним диаметром 35мм. Нагревательный элемент в виде спирали из нихрома с фарфоровыми изоляторами был намотан на трубу и снаружи защищен теплоизоляцией на основе базальтовой ваты. Контролировались температура и давление воды внутри трубы. Мощность нагревателя регулировалась при помощи лабораторного автотрансформатора. При этом максимальная температура теплоносителя достигала 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 уменьшается почти в пять раз, что, конечно, весьма существенно.

В процессе разогрева внутри герметично закрытого экспериментально-го участка происходит кипение и частичное испарение воды, а повышающее-

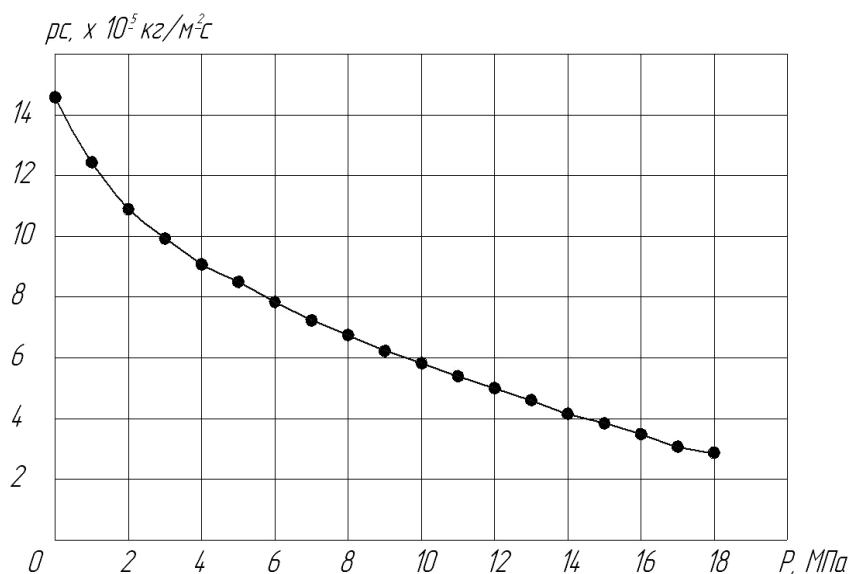


Рис.5. Зависимость волнового сопротивления воды от давления на линии насыщения

ся давление блокирует развитие кипения. Таким образом, наблюдается изо-хорический термодинамический процесс на линии насыщения воды (при по-стоянном объеме). При этом с ростом температуры и давления уровень воды постепенно увеличивается. Нами была определена ожидаемая расчетная за-висимость изменения уровня воды от давления на линии насыщения (давле-ние однозначно связано с температурой насыщения), показанная на рис.б.

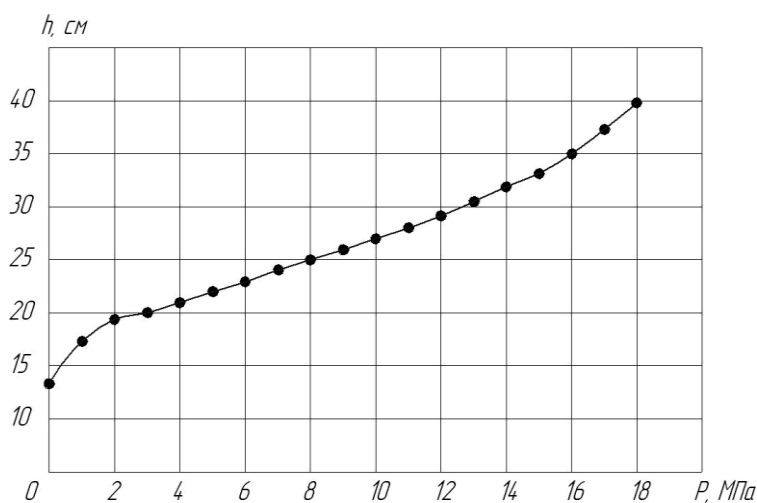


Рис.б. Расчетная зависимость изменения уровня теплоносителя в установке, отсчитываемого от нижнего кончика чувствительного элемента, от давления насыщения воды

Опыты проводились следующим образом. Перед проведением эксперимента система заполнялась водой до отметки 450мм от нижнего конца трубы, затем устанавливался уровнемер (при этом чувствительный элемент датчика погружается в жидкость на глубину 130мм) и система герметизировалась. После подготовки измерительной схемы на электрообогреватель подавалось напряжение мощностью около 400Вт. Температура в системе плавно повышалась со скоростью около $7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры около 350°C . При этом давление повышалось примерно до 18МПа. Контролировались температура и давление теплоносителя внутри трубы, а также акустические сигналы и выходной ток уровнемера.

В результате эксперимента получена зависимость измеренного уровня теплоносителя от расчетного на линии насыщения (рис. 7).

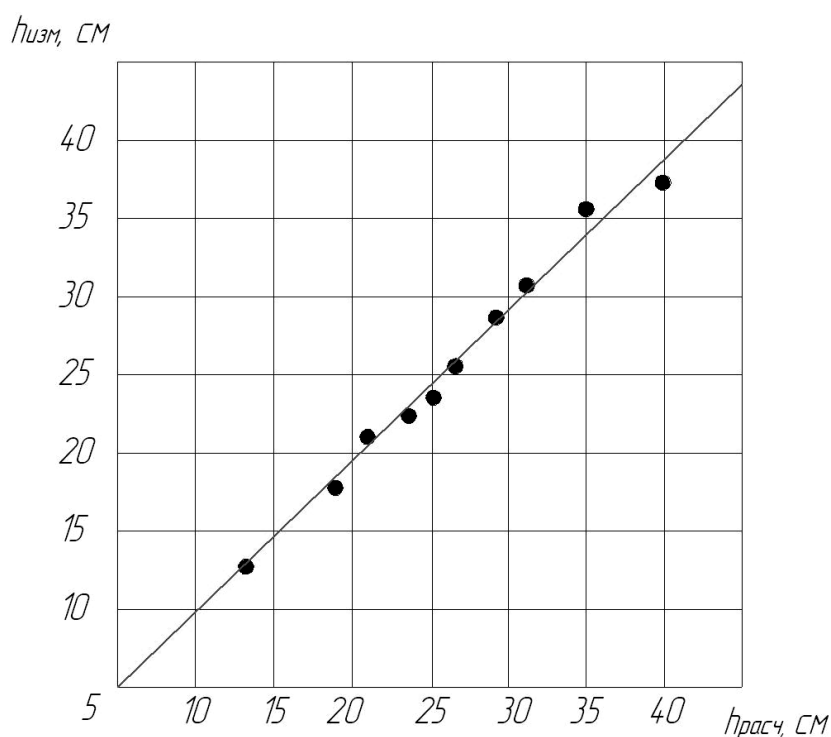


Рис.7. Зависимость измеренного уровня воды от расчетного на линии насыщения

Полученное расхождение уровня, измеренного рефлекс-радарным уровнемером теплоносителя с фактическим практически находится в пределах $\pm 10\text{мм}$, т.е. видим их вполне удовлетворительное совпадение.

Таким образом, коррекция показаний уровнемера не требуется во всем диапазоне изменения параметров теплоносителя, как первого, так и второго контуров.

Отметим, что в процессе проведения опытов наблюдалась флюктуация принимаемого акустического сигнала, обусловленная кипением среды. Наиболее сильная флюктуация сигнала зафиксирована при давлении свыше 14МПа. Однако, выбранный нами алгоритм обработки сигнала позволил устранить влияние последних на выходной сигнал прибора.

Сигнализатор изготовлен в виде законченного прибора, его внешний вид приведен на рис.8.

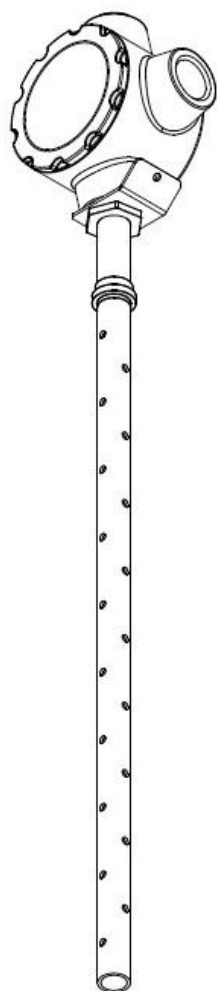


Рис 8. Внешний вид рефлекс-радарного ультразвукового уровнемера с интегрированным электронным блоком.

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., Синицын А.Н., Белин А.В Исследование перспективных волноводных акустических сигнализаторов уровня водяного теплоносителя ЯЭУ//Датчики и системы.- 2013.- №11.-С.11-17.
4. А.с. №322638, Дюдин Б.В. и др. Ультразвуковой уровнемер для жидкости. Оpubл.30.11.71. Бюл.№36.
5. А.с. №510648, Дюдин Б.В. Датчик ультразвукового импульсного уровнемера. Оpubл.15.04.76. Бюл.№14.

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@ntu.nnov.ru,
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@ntu.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