

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО АКУСТОИМПЕДАНСНОГО УРОВНЕМЕРА В ВОДЯНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРОВ**

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

Рассмотрены результаты экспериментального исследования работы акустоимпедансного уровнемера с волноводом продольных волн в водяном теплоносителе высоких параметров: давление до 18МПа, температура до 350<sup>0</sup>С. Показано, что прибор устойчиво работает в данных условиях, однако, необходима коррекция показаний, учитывающая изменение волнового сопротивления теплоносителя. Прибор предназначен для применения в теплообменном оборудовании тепловой и атомной энергетики.

Ключевые слова: уровнемер, акустический волновод, пьезопреобразователь, водяной теплоноситель высоких параметров, 350<sup>0</sup>С, 18МПа, энергетическое оборудование.

Акустоимпедансные уровнемеры основаны на измерении затухания акустических импульсов, распространяющихся по протяженному волноводу, при погружении его в жидкость [1,2]. Конструкция таких уровнемеров выполнена цельносварной, из легированных сортов стали, и не предусматривает использование каких-либо неметаллических материалов. Поэтому они способны работать продолжительное время в средах с экстремальными параметрами: при высокой температуре, давлении, радиационном и коррозионном воздействии. Важнейшие области применения таких уровнемеров это тепловая и атомная энергетика. Существенным отличием акустоимпедансных уровнемеров от многоточечных сигнализаторов уровня это их относительная простота, а, следовательно, большая надежность и низкая стоимость.

При практическом применении акустоимпедансных уровнемеров в тепловых аппаратах, например, для контроля уровня теплоносителя в парогенераторах, возникает проблема учета влияния на показания приборов изменения акустических свойств контролируемой среды при вариации ее температуры и давления. Кроме того, возможно влияние конденсата, стекающего по волноводному чувствительному элементу выше линии раздела фаз, а также кипения, приводящее к выделению парогазовых пузырей в жидкой фазе. Все это может привести к возникновению значительной погрешности. Поэтому возникает необходимость определения величины влияния перечислен-

ных факторов и поиска путей уменьшения возможной погрешности измерений.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований работы акустоимпедансного уровнемера в условиях максимально приближенных к реальным при широком изменении параметров контролируемой среды – водяного теплоносителя высоких параметров. Эксперименты проводили в водном теплоносителе на линии насыщения при вариации давления от 0,1 до 18 МПа. Экспериментальная установка пред-

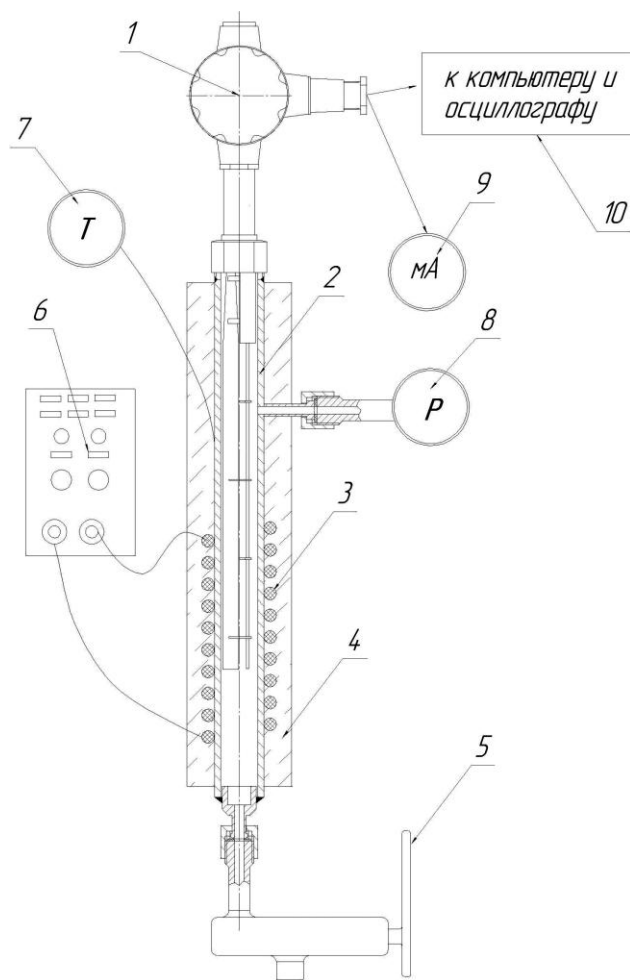


Рис.1. Экспериментальная установка

1-электронный блок, 2-труба, 3-нагревательный элемент, 4-теплоизоляция, 5-вентиль слива, 6-автотрансформатор, 7-термодатчик, 8-манометр, 9-измеритель тока, 10-осциллограф и компьютер

ставляла собой прочную герметично закрытую трубу с электрообогревом, в которую помещался уровнемер (рис.1). 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<sup>0</sup>С.

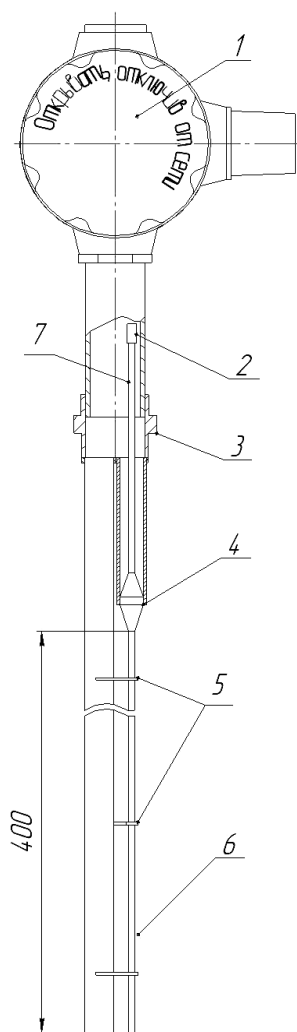


Рис.2. Конструкция акустоимпедансного уровнемера.  
1-электронный блок, 2-пьезопреобразователь, 3-подвеска, 4-узел уплотнения, 5-крепление, 6-чувствительный элемент, 7-волновод связи

Конструкция уровнемера включала стержневой чувствительный элемент диаметром 1,5мм и длиной 400мм, трубчатую подвеску, волновод связи чувствительного элемента с пьезопреобразователем, узел уплотнения и электронный блок (рис.2). Использовался ультразвуковой преобразователь продольных волн с рабочей частотой около 700кГц.

Функциональная схема обработки сигналов датчика приведена на рис.3. Она состоит из генератора видеоимпульсов, усилителя принятых сигналов, стробируемого пикового детектора, аналого-цифрового преобразователя, вычислителя, цифро-аналогового 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 с логарифмом амплитуды импульсов, отраженных

от нижнего кончика чувствительного элемента. Процессор выполняет функцию линейризации, вырабатывая выходной токовый сигнал согласно формуле:

$$I = a_0 + a_1 \ln (A_0/A_1), \quad (7)$$

где  $A_0$  и  $A_1$  – амплитуды принимаемых импульсов, отраженных от кончиков чувствительного элемента;

$a_0$  и  $a_1$  – настроечные коэффициенты, определяемые при калибровке таким образом, чтобы при отсутствии жидкости выходной сигнал был равен

4мА, а при полном погружении в воду при нормальных условиях– 20мА.

Проверка качества калибровки была выполнена при нормальных условиях, путем полного погружения чувствительного элемента датчика в жидко-

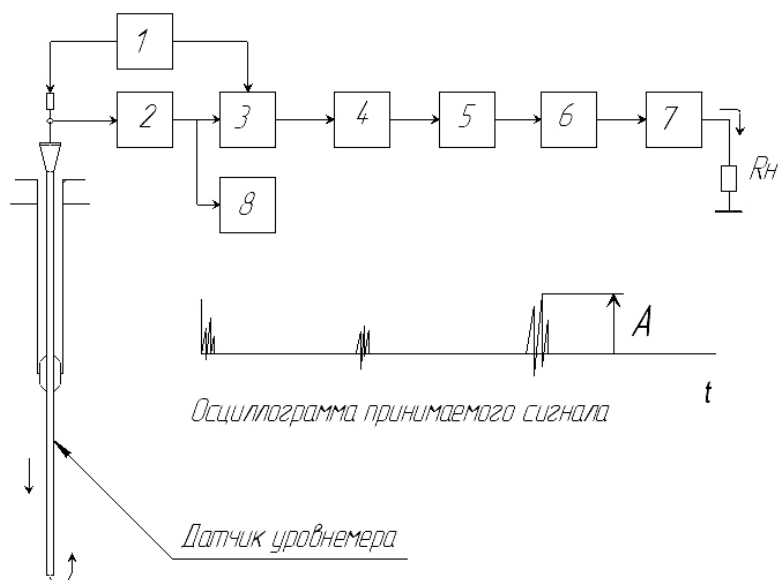


Рис.3. Функциональная схема электронной части уровнемера.

1-генератор видеоимпульсов, 2-усилитель, 3-стробируемый пиковый детектор, 4-АЦП, 5-вычислительный блок, 6-ЦАП, 7-генератор тока, 8-осциллограф

сти с различным волновым сопротивлением, имитирующими нагретую до различных температур воду, а именно в ацетон, гексан и т.д., при этом подтвердилось, что выходной ток изменяется пропорционально волновому сопротивлению жидкости.

В процессе разогрева внутри герметично закрытого экспериментально-

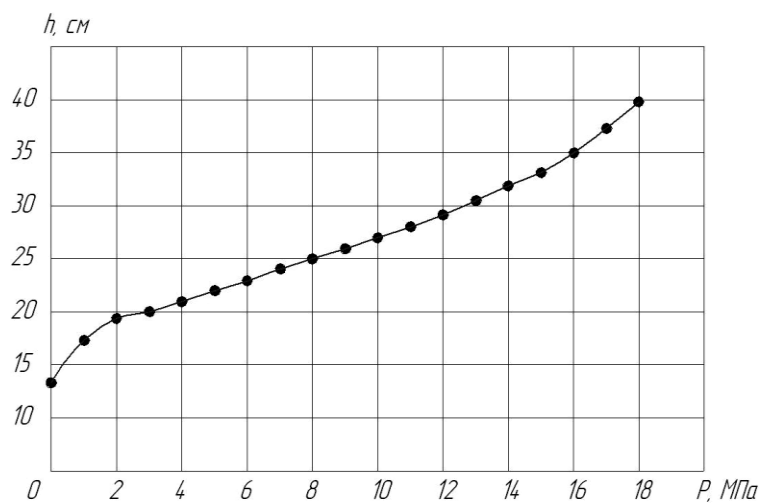


Рис.4. Расчетная зависимость изменения уровня теплоносителя в установке, отсчитываемого от нижнего кончика чувствительного элемента, от давления насыщения воды

го участка происходит кипение и частичное испарение воды, а повышающееся давление блокирует 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. Нами была определена ожидаемая расчетная зависимость изменения уровня воды от давления на линии насыщения (как известно, давление однозначно связано с температурой насыщения), показанная на рис.4.

Опыты при высоких параметрах проводились следующим образом. Перед проведением эксперимента система заполнялась водой до отметки 450мм от нижнего конца трубы, затем устанавливался уровнемер и система герметизировалась. После подготовки измерительной схемы на электрообогреватель подавалось напряжение мощностью около 400Вт. Температура в системе плавно повышалась со скоростью около  $7^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  примерно до  $350^{\circ}\text{C}$ . При этом давление повышалось до 18МПа. Контролировались температура и дав-

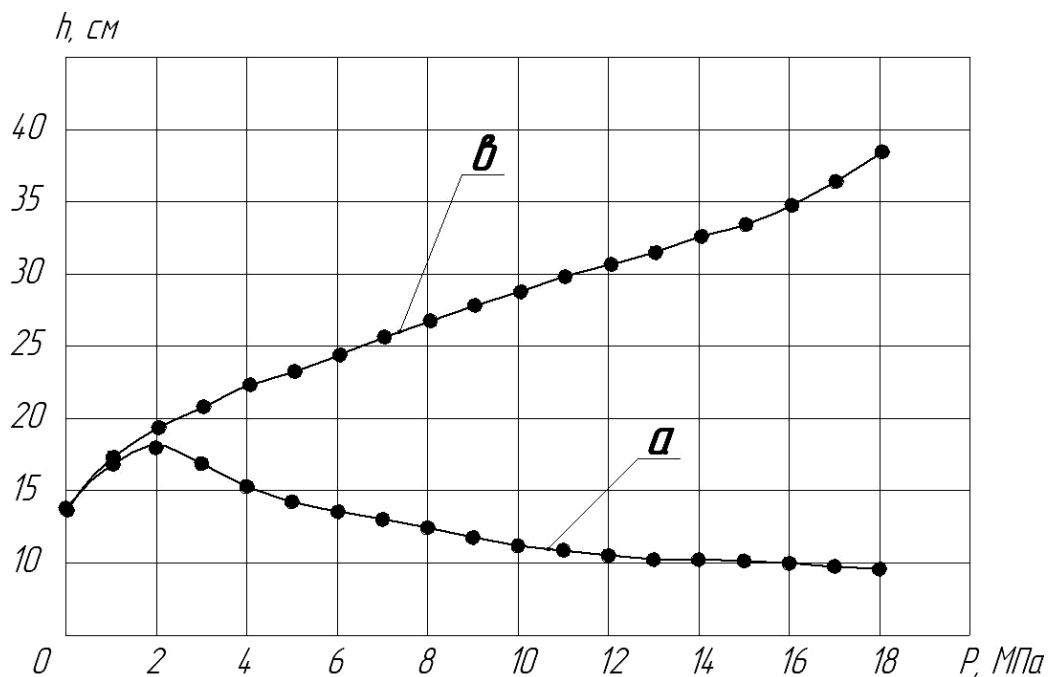


Рис.5. Зависимость уровня водяного теплоносителя от давления в системе.  
а – без коррекции изменения физических свойств воды;  
в – с учетом изменения акустического волнового сопротивления воды

ление теплоносителя внутри трубы, а также акустические сигналы и выходной ток уровнемера.

В результате эксперимента получена зависимость измеренного (не откорректированного) уровня теплоносителя от давления воды в системе на линии насыщения, без учета изменения физических свойств воды (рис. 5,а).

Сравнивая полученный экспериментальный результат (рис.5,а) и расчетную зависимость уровня теплоносителя от давления (рис.4), видим, что они значительно отличаются друг от друга.

Рассмотрим подробнее физические процессы, определяющие показания уровнемера.

Как известно, изменение амплитуды акустической волны в протяженном волноводе, вследствие демпфирования его поверхности жидкостью, определяется формулой:

$$A=A_0 \exp (-\delta lx), \quad (1)$$

где  $\delta$  – постоянная затухания;

$l$  – длина волновода, при двойном пробеге ультразвукового импульса по волноводу (туда – обратно) берется двойная длина;

$x$  – доля волновода, погруженная в жидкость.

Постоянная затухания продольной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе определяется формулой [1]:

$$\delta=k \rho c, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная, зависящая от материала и геометрии волновода, а также от частоты ультразвука;

$\rho$  и  $c$  – плотность и скорость звука в воде, соответственно. Произведение  $\rho c$  называют акустическим волновым сопротивлением среды.

Таким образом, при фиксированных геометрии волновода и частоте ультразвука, амплитуда принимаемых ультразвуковых импульсов, пробежавших по волноводу, определяется двумя физическими величинами: уровнем жидкости и ее волновым сопротивлением.

Зависимость волнового сопротивления воды от давления на линии насыщения приведена на рис.6. Отметим, что в диапазоне изменения давления

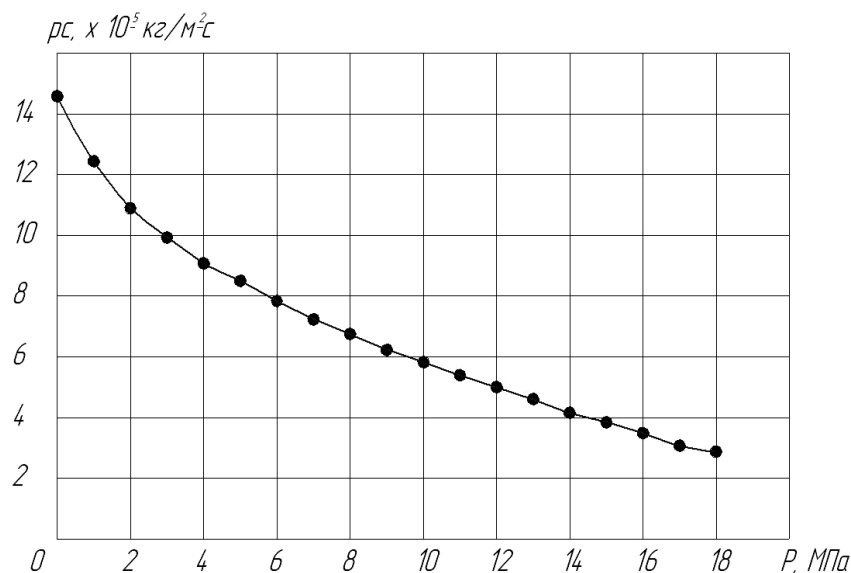


Рис.6. Зависимость волнового сопротивления воды от давления на линии насыщения

от 0,1 до 18МПа волновое сопротивление уменьшается почти в пять раз, что, конечно, весьма существенно.

Поскольку одновременно с ростом давления волновое сопротивление воды уменьшается, а уровень теплоносителя в установке увеличивается, то можно констатировать, что наблюдаются два физических процесса, один из которых приводит к увеличению выходного токового сигнала уровнемера, а второй – к его уменьшению. Что объясняет необычную форму зависимости рис.5,а, Очевидно, в данном случае совершенно необходимо учитывать изменение волнового сопротивления теплоносителя.

Выполнив коррекцию результатов измерений, приведенных на рис.5,а, т.е. учтя изменение волнового сопротивления теплоносителя при росте давления, получаем реальную зависимость уровня воды от давления (рис.5,в). Сравнивая последнее с расчетным изменением уровня воды в изохорическом процессе (рис.4), видим их вполне удовлетворительное совпадение.

Таким образом, коррекция показаний акустоимпедансного уровнемера (учет акустического волнового сопротивления контролируемой среды) в подобных случаях необходима и может быть выполнена с использованием дополнительных информационных каналов, например, о температуре процесса,

или с использованием эталонного прибора, обеспечивающего выдачу информации о волновом сопротивлении среды.

Отметим, что каких-либо флуктуаций принимаемого акустического сигнала, обусловленных кипением среды или влиянием конденсата, не обнаружено.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников В.И. Волноводные акустоимпедансные уровнемеры и сигнализаторы жидкости//Датчики и системы.- 2011.- №12.-С.6-10.
2. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. М.: Энергоатомиздат. 2006. 351с.

Мельников Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.  
Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-902-780-49-92, [melnikov@ntu.nnov.ru](mailto:melnikov@ntu.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. Алексеева.  
Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-920-299-88-43, [ivv@ntu.nnov.ru](mailto:ivv@ntu.nnov.ru)

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