

УДК 681.121

## **ВОЛНОВОДНЫЙ АКУСТОЗОНДОВЫЙ ПРИБОР КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СВОБОДНОГО ГАЗА В ЖИДКОСТИ**

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

Предложена конструкция прибора контроля истинного объемного газосодержания (паросодержания) в потоке жидкости на основе акустического зондирования. Благодаря применению волноводов прибор способен работать длительное время в широком диапазоне температур и давлений контролируемой среды ( $-200 - +400^{\circ}\text{C}$ , 20МПа). Прибор предназначен для использования в тепловой энергетике, химической промышленности, нефтедобыче. Приведены результаты калибровки прибора дилатометрическим методом в вертикальной трубе. Даны рекомендации по применению прибора.

Ключевые слова: прибор контроля концентрации газа в потоке жидкости, акустическое зондирование, волноводы, паросодержание, тепловая энергетика, химические технологии, нефтедобыча.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Измерение содержания свободного газа в газожидкостных потоках является актуальной задачей во многих областях техники и технологии. В частности, в тепловой и ядерной энергетике, в химических аппаратах, в оборудовании, применяемом при нефте- и газо-добыче. В энергетике это относится, прежде всего, к контролю паросодержания в парогенераторах и теплообменниках, обнаружению газа в трубопроводах при транспортировке горячей воды. В химической промышленности необходим контроль процессов тепло-массообмена в газожидкостных реакторах, таких как барботажные колонны и аппараты с мешалкой. В нефтяной промышленности необходимо отслеживать газосодержание в процессах дегазации нефти и рабочих жидкостей при нефтедобыче и транспортировке.

При этом, как правило, нужно обеспечивать долговременное непрерывное измерение истинного объемного газосодержания или паросодержания двухфазного потока в реальном времени на всех режимах работы оборудования в диапазоне концентраций от нуля до 100%.

Измерение газосодержания является достаточно сложной технической проблемой. В настоящее время предложено множество методов и опытных

конструкций для решения этой задачи в различных отраслях техники. Однако, отработанных и готовых к широкому использованию приборов на рынке практически нет.

Из известных и многократно опробованных на практике конструкций наиболее перспективными являются устройства, основанные на использовании ультразвуковой технологии – акустические волноводные зонды для измерения локального истинного объемного паросодержания (газосодержания) методом акустического зондирования [1,2].

Их отличительными особенностями являются:

- способность длительно работать в высокотемпературном, химически агрессивном потоке среды;
- способность выдерживать высокие статические и динамические нагрузки по давлению;
- позволяют определять концентрацию газовой фракции в диапазоне от нуля до 100%, при этом электропроводные свойства контролируемой жидкости не оказывают влияния на работу прибора;
- высокое быстродействие и компактность.

Отметим, что в практике теплофизического эксперимента находят применение также электрические, оптические и тепловые зондовые датчики, однако, они существенно уступают по своим техническим характеристикам акустическим зондам.

## **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ГАЗСОДЕРЖАНИЯ**

Нами была поставлена задача разработки прибора для измерения истинного объемного газосодержания на основе акустозондирования для применения в промышленных условиях. Прибор должен обладать следующими особенностями: способностью работать в широком диапазоне температур контролируемой среды и окружающего воздуха, выдерживать статические и

динамические нагрузки потока контролируемой среды, иметь стандартный выходной сигнал, быть пригодным для серийного производства.

В качестве прототипа выбран сигнализатор уровня жидкости СЖУ-1-В, определяющий наличие жидкости или газа в контролируемом объеме методом акустозондирования. Сигнализатор производится компанией ООО «АИС-НН», г. Нижний Новгород.

Отличительными особенностями этого прибора являются:

- способность регистрировать газовые фрагменты в потоке жидкости с высоким быстродействием;
- относительно небольшие размеры чувствительного элемента, практически не «затесняющие» поток;
- работоспособность независимо от электропроводности и других физических свойств контролируемой среды;
- высокая стойкость в среде с высокой температурой, давлением и химической агрессивностью;
- цельносварная конструкция погружной части прибора.

Измерение локального истинного объемного газосодержания методом зондирования фактически сводится к измерению доли времени, в течении которого газовая фаза находится в контролируемом локальном объеме, расположенном в потоке среды. Газосодержание определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\sum \tau_i}{T} \quad (1)$$

где  $\tau_i$  – время нахождения  $i$ -го фрагмента газовой фазы (пузырька или снаряда) в контролируемом объеме;

$T$  – общее время измерения.

Необходимым условием нормальной работы зондового метода является малая величина контролируемого объема среды по сравнению с объемом диспергированных фаз в потоке. То есть размер чувствительных элементов зонда, формирующих контролируемый объем, должен быть минимальным,

предпочтительно меньшим, чем размер большинства газовых включений в потоке контролируемой среды.

Рассмотрим подробнее технику решения поставленной задачи.

Объемная концентрация газовой фазы измеряется методом акустического зондирования. Реализация акустического зонда осуществляется при помощи пары волноводных акустических датчиков, один из которых является излучателем, а второй – приемником акустических ультразвуковых импульсов (рис.1). Прохождение газового образования между излучателем и приемником ведет к скачкообразному уменьшению амплитуды принятых импульсов практически до нуля, что фиксируется вторичной схемой. Измеряется отношение числа импульсов не прошедших через контролируемый объем к числу излученных импульсов. Полученная величина преобразуется в токовый выходной сигнал.

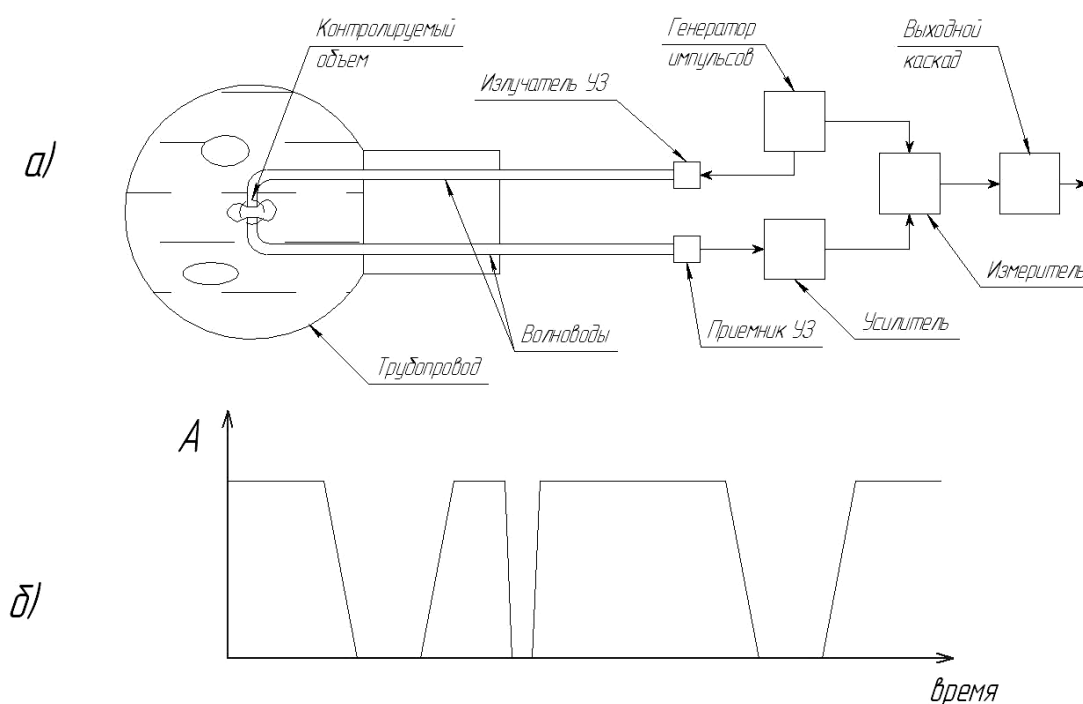


Рис.1. Схема акустического зондирования двухфазного потока в трубе  
а) блок-схема прибора; б) изменение сигнала на выходе зонда

Рассмотренный выше алгоритм решения задачи измерения газосодержания был использован в разработанном нами приборе.

Он включает акустический зонд, состоящий из двух волноводов, излучающего и приемного, закрепленных на подвеске и снабженных узлами гер-

метизации, и электронный блок на основе микропроцессора в прочном герметичном корпусе, обеспечивающий генерацию и прием зондирующих

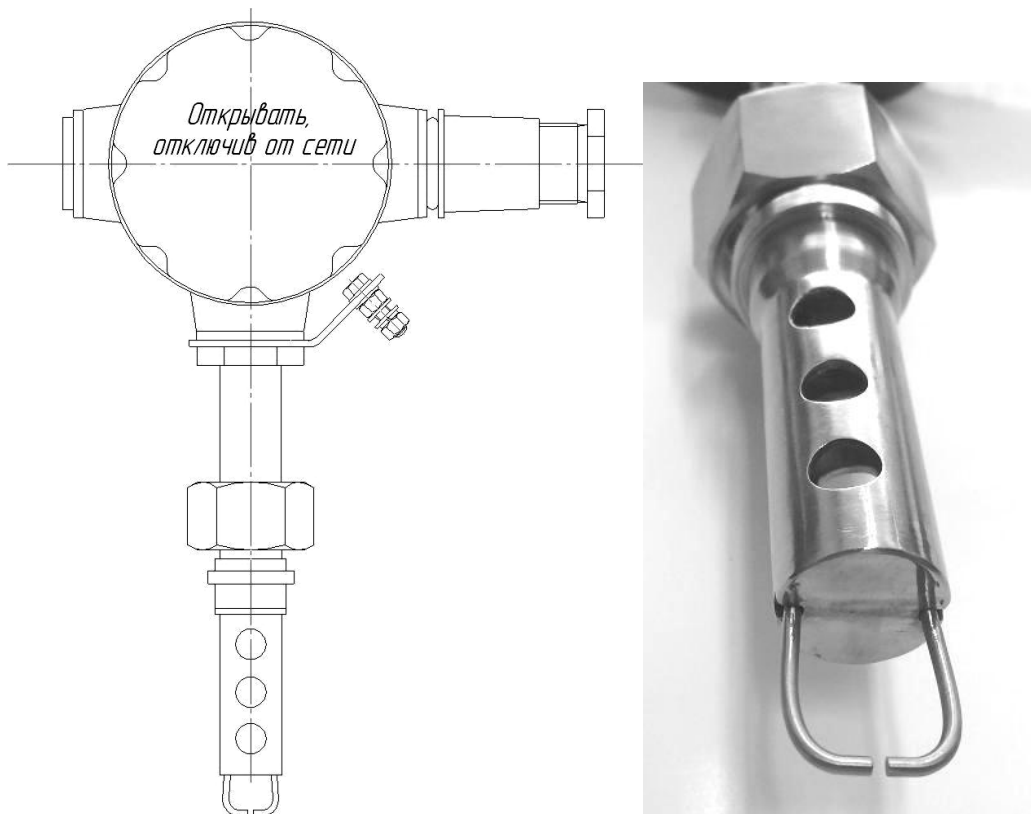


Рис.2. Внешний вид прибора контроля концентрации газа в газожидкостном потоке

импульсов, обработку информации и выработку выходного сигнала (рис.2).

В приборе использованы волноводы диаметром 2мм. Расстояние между излучателем и приемником составляло 2,5мм. Для обеспечения жесткости конструкции волноводы закреплялись в подвеске. Все детали, контактирующие с контролируемой средой, изготовлены из нержавеющей стали. В качестве излучателя и приемника ультразвуковых импульсов применены пьезоэлементы диаметром 3мм, толщиной 0,8мм, изготовленные из керамики ЦТС-19. Рабочая частота ультразвука около 600кГц. Частота следования зондирующих импульсов 1кГц.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Калибровка прибора выполнена в водо - воздушном потоке при нормальных условиях организованном в барботажной колонне с возможностью регулируемой подачи воздуха снизу (рис.3). С ее помощью простыми средствами можно реализовать калибровку прибора дилатометрическим методом, используя лишь мерную линейку [3].

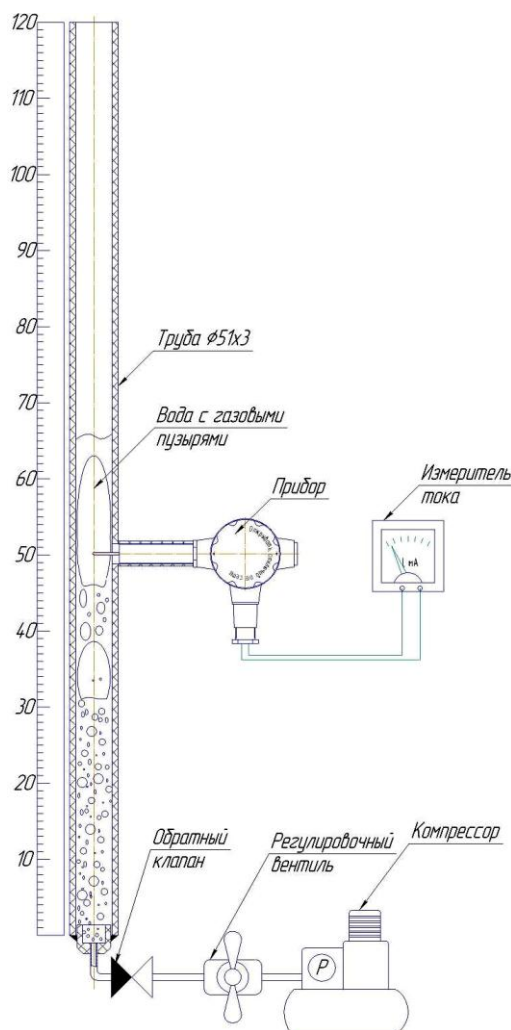


Рис.3. Схема опытной установки с барботажной трубой и системой подачи газа

Согласно этому методу истинное среднее по сечению объемное газосодержание в барботажной трубе определяется соотношением:

$$\varphi = \frac{\Delta H}{H_0 + \Delta H} \quad (2)$$

где  $H_0$  – начальный уровень воды в трубе (без воздуха);

$\Delta H$  – приращение уровня воды, вызванное подачей воздуха.

Рассмотрим подробнее процесс функционирования акустического зонда в потоке среды.

Практически, при взаимодействии чувствительного элемента датчика (зонда) с двухфазным потоком, вследствие конечности размеров волноводов,

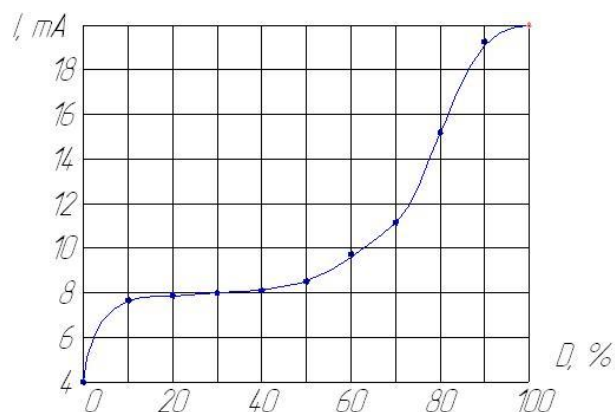


Рис.4. Зависимость амплитуды выходного сигнала от уровня дискриминации

влияния вязкости, поверхностного натяжения жидкости и других факторов, амплитуда импульсов, пересекающих контролируемый объем, при прохождении газовых включений меняется с некоторой задержкой (рис.1,б). Поэтому на практике для уменьшения погрешности следует выбирать оптимальный пороговый уровень срабатывания – уровень дискриминации, прохождения которого сигналом засчитывается как момент срабатывания зонда: газ – жидкость. При этом величина тока на выходе прибора может зависеть от выбора этого уровня.

Типичный вид зависимости тока на выходе прибора от уровня дискриминации при фиксированном газосодержании показан на рис.4. Обратим внимание на наличие «плато» на кривой в области уровня дискриминации  $D$  от 10 до 50% от максимальной амплитуды сигнала в контролируемой жидкости. Это означает, что при выборе уровня дискриминации в области 20 – 40% погрешность измерений будет минимальна.

Опыты проводились при истинном объемном газосодержании около 20%. При этом зонд был установлен таким образом, чтобы контролируемый объем находился в геометрическом центре барботажной трубы на высоте 50см от нижнего конца трубы.

На следующем этапе работы была выполнена калибровка прибора с использованием этой же экспериментальной установки. При этом при помощи регулировочного вентиля устанавливались различные уровни среднего истинного газосодержания по объему трубы в диапазоне от нуля до 40%.

Учитывая, что измеряемой величиной является локальное истинное объемное газосодержание в центре трубы и распределение локального газосодержания по диаметру имеет профиль близкий к параболическому, было принято, что измеряемое нами локальное значение  $\alpha$  вдвое выше среднего по объему. Это подтверждается нашими ранними исследованиями [3].

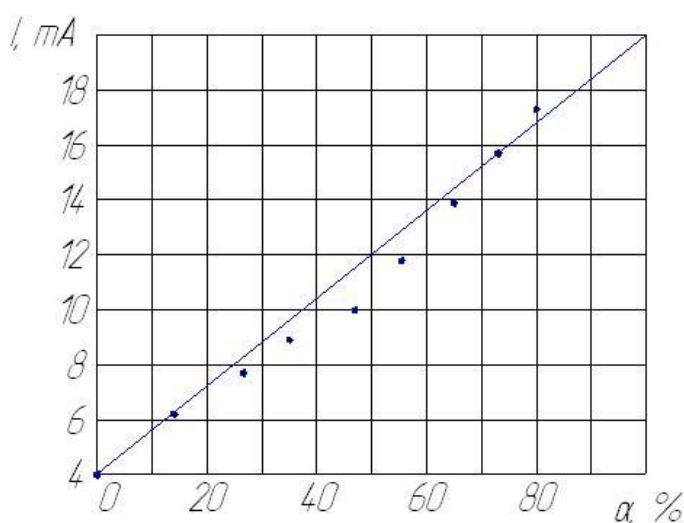


Рис.5. Зависимость выходного тока прибора от газосодержания

В результате была получена зависимость выходного сигнала прибора (пропорционального измеренному газосодержанию) от заданного (рис.5).

Как видим, эта зависимость носит линейный характер, а среднеквадратичное отклонение не превышает нескольких процентов.



## **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

Важным условием применимости зондовых методов для измерения параметров гетерогенных газожидкостных потоков является выполнение условия: размер контролируемого зондом объема среды должен быть преимущественно меньше размера дисперсоидов фаз в потоке. При этом сигнал на выходе зонда будет иметь вид двухуровневой бинарной последовательности. В противном случае данная методика не применима. Поэтому представленный в данной работе прибор следует использовать в случаях, когда поток является снарядным или пузырьковым с размерами газовых включений преимущественно больше 2м м.

Второе, что следует учитывать при использовании зонда, это место его установки, ведь он измеряет локальное газосодержание, которое может значительно отличаться от среднего. В частности, при вертикальном течении, как правило, распределение газосодержание по диаметру трубы имеет максимум по центру и нулевое на поверхности трубы. При горизонтальном течении газовые фракции собираются у верхней внутренней поверхности трубопровода.

Заметим, что несколько приборов позволяют измерять распределение газосодержания по сечению потока, по которому несложно определить среднее по сечению газосодержание.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Представлен разработанный впервые ультразвуковой зондовый прибор контроля газосодержания (паросодержания) потока приспособленный для применения в различных областях техники, в частности, для контроля паросодержания в парогенераторах и испарителях, газосодержания буровых растворов, в барботажных установках химических производств и других областях техники и технологии. Важной особенностью прибора является то, что в нем благодаря применению волноводов излучатель и приемник ультразвука вынесены из зоны воздействия потока среды и поэтому он может устойчиво

работать, в том числе, в средах с криогенной или крайне высокой температурой (-200 - +400<sup>0</sup>С). Давление среды может достигать 20МПа.

Серийное производство осуществляется компанией «Акустические Измерительные Системы – НН», [www.ais-nn.ru](http://www.ais-nn.ru) .

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мельников В.И. Диагностика двухфазных потоков методом акустического зондирования // Промышленная теплотехника, 1981. Т.3, №2, с.110-116.
2. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. М.: Энергоатомиздат. 2006. 351с.
3. Махин В.А., Мельников В.И., Шатров В.А. Оценка точности измерения паросодержания методом акустического зондирования // Промышленная теплотехника, 1981. Т.3, №4, с.83-86.

## Сведения об авторах

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@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. Алексеева. 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. Алексеева, моб. 8-904-044-18-94, [ivantia@mail.ru](mailto:ivantia@mail.ru)

Mel'nikov Vladimir Ivanovich, professor of department "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, prof., dokt. tekhn. sci., e-mail: [melnikov@nntu.nnov.ru](mailto:melnikov@nntu.nnov.ru), [www.aisnn.com](http://www.aisnn.com);

Ivanov Vadim Vladimirovich, docent of department "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, cand. tekhn. sci., e-mail: [ivv@nntu.nnov.ru](mailto:ivv@nntu.nnov.ru) ;

Teplyashin Ivan Alekseevich, postgraduate of department of "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, e-mail: [ivantia@mail.ru](mailto:ivantia@mail.ru) ;

## **The Waveguide Acoustic Device for Gas-content Control in the Liquid Flow**

V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, I.A. Tepljashin

The new design of the device based on acoustic sensing for the control of the true volumetric gas (vapor) content in the liquid flow was developed. The device is able to operate during long term in the wide temperature (from  $-200^{\circ}\text{C}$  to  $400^{\circ}\text{C}$ ) and pressure (up to 20MPa) ranges of controlled medium.

The calibrating curve of dependence amplitude signal of device on gas content was linear. The measures gas content was coincident with data measured by dilatometric methods.

The recommendations for the use of the device in thermal power engineering, chemical and oil industry.

**Key words:** control device, of the gas concentration in the fluid flow, acoustic waveguides, void fraction, thermal power, chemical engineering, oil production