

# РАДИОФИЗИКА

УДК 53.087.4+534.6+681.128

## УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УРОВНЯ АГРЕССИВНЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАКРЫТЫХ ЕМКОСТЯХ

© 2011 г.

*Р.В. Беляев<sup>1</sup>, В.А. Грибов<sup>2</sup>, А.Г. Кириллов<sup>1</sup>, А.В. Кунаев<sup>1</sup>,  
А.М. Рейман<sup>1</sup>, В.Н. Шанин<sup>1</sup>, А.В. Шишков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup> ООО НТФ «Медуза», Нижний Новгород

rey@appl.sci-nnov.ru

*Поступила в редакцию 08.04.2010*

Описаны принципы построения измерителей уровня жидкости в закрытых емкостях, содержащих агрессивные, токсичные, горючие среды. Проведено сравнение различных методов измерений, описаны технические решения и оценки точности измерений приборами типа «АУЗУР».

*Ключевые слова:* ультразвук, измерители уровня, агрессивные жидкости, одорант природного газа, скорость звука.

### Введение

Работа посвящена изложению принципов построения и подробностей технической реализации надежного и недорогого прибора для измерения уровня жидкости в закрытой емкости. Требование надежности диктуется необходимостью обеспечить долговременную круглосуточную работу без вмешательства оператора, стабильность показаний и помехозащищенность выходной информации. Приборы должны обеспечивать возможность измерений уровня жидкости в толстостенной металлической емкости, причем жидкость может быть горючей, токсичной, химически агрессивной (одорант, конденсат, органические и неорганические кислоты и щелочи), а сама емкость может располагаться как на открытом пространстве, так и в бункере или может быть засыпана грунтом. Это налагает ряд дополнительных требований взрывобезопасности и пылевлагозащиты к прибору и его составным частям. Прибор должен обеспечивать передачу результатов измерений в стандартные системы телеметрии и быть совместимым с системами аварийной сигнализации.

Одной из частных задач, определяющих конструктивно-технические особенности разрабатываемого прибора, является необходимость учета товарных запасов и контроль расхода одоранта природного газа на газораспределительных станциях (ГРС). Одорант – агрес-

сивная химическая среда, применяемая в качестве добавки к природному газу с целью индикации его утечек из трубопроводов, промышленных и бытовых газовых агрегатов и приборов. В качестве одоранта используется смесь природных или синтетических меркаптанов – химических соединений с резким характерным запахом, причем состав смеси меняется от партии к партии и обычно неизвестен; неизвестны также акустические и теплофизические свойства (скорость звука, коэффициент теплового расширения, плотность и т.д.). Высокая токсичность и огнеопасность, крайне низкие значения ПДК требуют учета товарных запасов, т.е. объема и массы вещества, находящегося на ГРС в подземных емкостях хранения одоранта (ПЕО), а также уровня и расхода вещества в блоках одоризации газа и находящихся в них расходных емкостях одоранта (РЕО). В настоящее время такой учет практически отсутствует, за исключением немногих ПЕО, оснащенных радарными уровнемерами, а уровень жидкости периодически проверяется рейкой через люк в емкости. Контроль расхода в РЕО осуществляется визуально оператором ГРС с помощью водомерных стекол, какая-либо сигнализация падения уровня жидкости в РЕО ниже минимальной отметки отсутствует. Очевидно, что задача оснащения ГРС надежными и недорогими уровнемерами является весьма актуальной.

Существует множество методов, позволяющих измерять уровень жидкости в емкостях, однако применительно к задаче измерения уровня одоранта они оказываются малоприменимы. Так, например, контактные методы (поплавковые, волноводные, емкостные и др.) [1–4] предполагают ввод зонда внутрь емкости с частичным погружением измерительного элемента в жидкость, что может привести к выходу измерительного элемента из строя. Использование радиоизотопного метода [5] требует оснастить емкость специальной конструкцией для помещения внутрь ее источников излучения, что делает практически невозможным применение таких измерителей на уже имеющихся емкостях. Кроме того, точность измерений оказывается невысокой, зато требуется организация хранения, замены и утилизации радиоактивных препаратов. Локационные уровнемеры (как ультразвуковые, так и СВЧ) в принципе способны обеспечить высокую точность измерений, однако приемопередающий элемент должен находиться непосредственно в газовой фазе внутри емкости [6]. Это, во-первых, приводит к необходимости либо использовать имеющийся заливочный люк, либо дополнительно высверливать отверстие для ввода излучателя внутрь емкости, что крайне нежелательно; во-вторых, агрессивная среда будет постепенно разрушать излучающий элемент. Для ультразвукового измерителя возникает дополнительная проблема необходимости самокалибровки по какому-либо реперу внутри емкости, так как скорость звука в газовой фазе над летучей жидкостью будет сильно зависеть как от температуры, так и от химического состава. Оптические дальномеры, обеспечивая высокую точность измерения расстояний, не выдерживают длительной работы из-за конденсации влаги на защитном стекле или его загрязнения.

### Схема измерений

Таким образом, практически безальтернативным представляется использование ультразвуковой локации через стенку емкости и толщину жидкости. Прежде всего, этот метод не предполагает нарушения целостности емкости, что повышает безопасность эксплуатации. Использование диапазона частот 1–10 МГц позволяет обеспечить достаточно большую глубину локации (1–2 м) из-за сравнительно невысокого затухания ультразвука, обеспечивая продольное разрешение порядка 1–2 мм из-за высокой скорости звука. Очевидно, что для достижения приемлемой точности требуется либо знание

скорости звука и ее зависимости от температуры, либо использование дополнительного канала локации (опорного канала) с известным расстоянием до отражателя.

Условная схема метода для горизонтальной цилиндрической емкости (чаще всего применяемых в качестве ПЕО) представлена на рис. 1а. Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) размещается на дне емкости так, чтобы излученный ультразвуковой импульс распространялся вертикально вверх перпендикулярно к границе раздела жидкой и газовой фаз. Отражение от горизонтальной поверхности жидкости практически 100%, далее отраженный сигнал, пройдя через стенку, принимается тем же преобразователем. В качестве опорного канала целесообразно использовать такой же датчик, расположенный на горизонтальном диаметре цилиндра, при этом отражателем служит противоположная стенка емкости. Для вертикальных цилиндрических емкостей, применяемых в ПЕО, опорный канал можно располагать на любой высоте, желательно как можно ниже (см. рис. 1б). Измеряя время задержки между стартовым

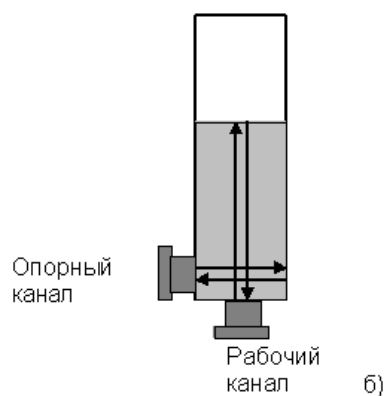
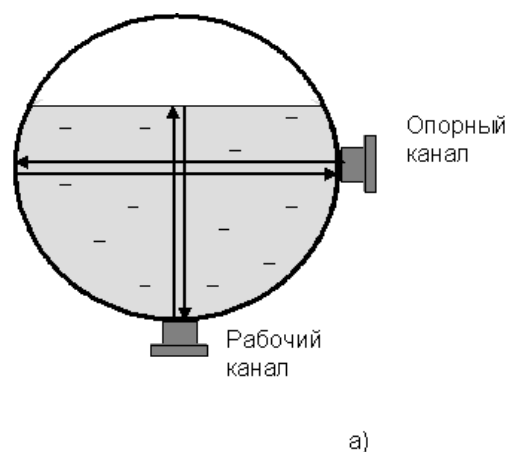


Рис. 1. Функциональная схема ультразвукового измерения уровня жидкости: а) для ПЕО; б) для ПЕО

импульсом и отраженным эхо-сигналом (время прихода), получим

$$H = \frac{c \left( \tau - \tau_0 - \frac{2d}{c_{cm}} \right)}{2} \quad (1)$$

для одноканального режима,

$$H = D \frac{\tau_{раб} - \tau_0 - \frac{2d}{c_{cm}}}{\tau_{он} - \tau_0 - \frac{2d}{c_{cm}}} \quad (2)$$

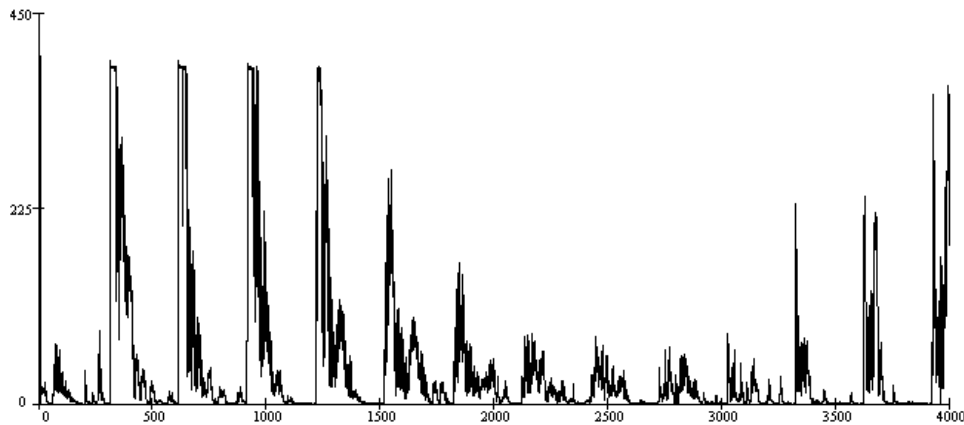
для двухканального режима.

Здесь  $H$  – уровень жидкости;  $D$  – диаметр емкости;  $d$  – толщина стенки емкости;  $\tau$  – время прихода эхо-импульса;  $\tau_0$  – время задержки в ПЭП;  $c_{cm}$  – скорость звука в стенке емкости, индексы «раб» и «он» относятся к времени прихода эхо-импульса в рабочем и опорном каналах соответственно.

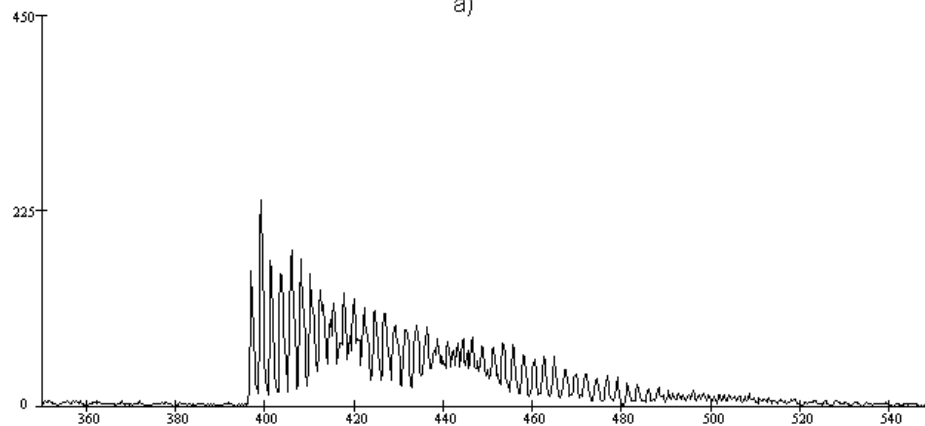
Очевидно, основной проблемой при реализации измерителя является обеспечение его

чувствительности. Поскольку ПЭП отделен от жидкости стальной стенкой, нетрудно подсчитать, что в жидкость попадает 5–7% излученной акустической энергии. Отраженная от границы раздела фаз волна также должна пройти через стенку, таким образом, даже при идеальном отражении приходящая к ПЭП волна значительно ослаблена, что накладывает определенные требования на усилительный тракт. Увеличение импульсного напряжения, подаваемого на ПЭП, возможно лишь в небольших пределах (100–150 В) из соображений обеспечения взрывобезопасности. Однако за счет правильного выбора конструкции ПЭП и схем электрического согласования зачастую удается наблюдать не только однократное прохождение импульса до границы раздела фаз, но и многократные (см. рис. 2а).

Помимо ослабления акустического импульса в стенке, существенный мешающий фактор – появление множественных переотражений в стенке. Эхо-сигнал, приходящий из среды,



а)



б)

Рис. 2. Осциллограммы отраженных эхо-сигналов для РЕО. а) Последовательность импульсов, соответствующая многократным отражениям от границы «жидкость – газ»; б) последовательность импульсов, соответствующая переотражениям в стенке емкости. Время по горизонтали – в мкс, вертикальный масштаб – в условных единицах

представляет собой последовательность из нескольких десятков импульсов, которые, в зависимости от параметров ПЭП и стенки емкости, могут частично перекрываться, приводя к сложной амплитудной модуляции (рис. 2б). В то же время анализ последовательности позволяет дополнительно измерить время задержки импульса в стенке, не вычисляя его. Это оказывается важно для емкостей, изготовленных из труб, для которых локальная толщина стенки может отличаться от номинальной на несколько миллиметров.

Влиять на вид последовательности импульсов, затрудняя анализ, могут и другие факторы. Например, в условиях РЕО на ГРС с большим расходом газа наблюдаются сильные вибрации, приводящие к возбуждению волн на поверхности жидкости и к уходу отраженного ультразвукового пучка от первоначально вертикального направления. Это может приводить к тому, что во время зондирования первая последовательность импульсов, соответствующая однократному прохождению импульса до границы раздела и обратно, может стать меньше второй или вообще пропасть, что приводит к усложнению алгоритма поиска. Для ПЕО одним из немаловажных факторов является горизонтальность расположения емкости, особенно при установке измерителя уровня не на новую, а на имеющуюся на ГРС емкость, которая не горизонтировалась при установке. Оценки показывают, что отклонение от горизонтали, не приводящее к пропаданию отраженного сигнала, не должно превышать  $3^\circ$ . Еще одним мешающим фактором для старых емкостей является наличие рыхлого коррозионного слоя на внутренней стенке, зачастую приводящего к ослаблению сигнала в десятки раз.

Применяя сложный алгоритм поиска первого подходящего сигнала, совмещающий корреляционную обработку принятых сигналов и двухпороговую схему обнаружения пересечения уровня с автоматическим вычислением величин порогов по уровню сигнала и уровню шума, можно обеспечить достаточно высокую точность измерения времени прихода – в нашем случае доли микросекунды. Однако на точность измерения уровня в одноканальном режиме влияет прежде всего точность знания скорости звука в среде, входящей в формулу (1). Основной проблемой здесь является то, что для одоранта природного газа отсутствуют данные о скорости звука и ее зависимости от температуры. Более того, скорость звука существенно зависит от химического состава одоранта, который меняется

от партии к партии. Это ставит дополнительную задачу получения такой информации, которая была выполнена в процессе технических испытаний партии разработанных авторами измерителей. Для учета температурной зависимости скорости звука акустический зонд был снабжен датчиком температуры. Это позволяет довести относительную погрешность измерений уровня до 1.5–2%. Однако для больших емкостей (диаметром 1200–1600 мм и длиной 4–6 м) это приводит к большой абсолютной погрешности, которая в пересчете на объем жидкости может составлять десятки литров. Выходом является использование двухканальной схемы измерений; в этом случае, как видно из формулы (2), наибольшее влияние на точность измерения уровня оказывает точность знания внутреннего диаметра емкости, который обычно известен лишь номинально и отклонения которого могут составлять единицы миллиметров. Тем не менее относительная погрешность измерений для ПЕО оказывается достаточно небольшой. Для РЕО, как ни парадоксально, точность двухканальных измерений может оказаться даже ниже, чем для одноканальной схемы. Это связано с тем, что измеряемые уровни в несколько раз больше диаметра вертикальной цилиндрической емкости, и небольшая погрешность измерения диаметра (порядка 1 мм) накапливается и приводит к значительной погрешности пересчета. Выходом здесь является изготовление РЕО, специально приспособленных для установки ультразвуковых уровнемеров, для которых внутренний диаметр в зоне установки опорного ПЭП измеряется тщательно на этапе изготовления и вносится в паспорт емкости.

### Автоматизированный измеритель уровня

Описанный принцип построения уровнемера был реализован авторами в виде автоматизированного прибора «АУЗУР-02» [7], блок-схема которого представлена на рис. 3. Прибор состоит из электронного блока, размещаемого в помещении оператора ГРС вне взрывоопасной зоны, и одного или двух акустических зондов, устанавливаемых на емкость. Соединение электронного блока с ПЭП производится защищенным кабелем через клеммные коробки, устанавливаемые как в помещении оператора, так и во взрывоопасной зоне. Требования к коробкам и кабелю определяются необходимостью обеспечения высокого уровня взрывозащиты на ГРС.

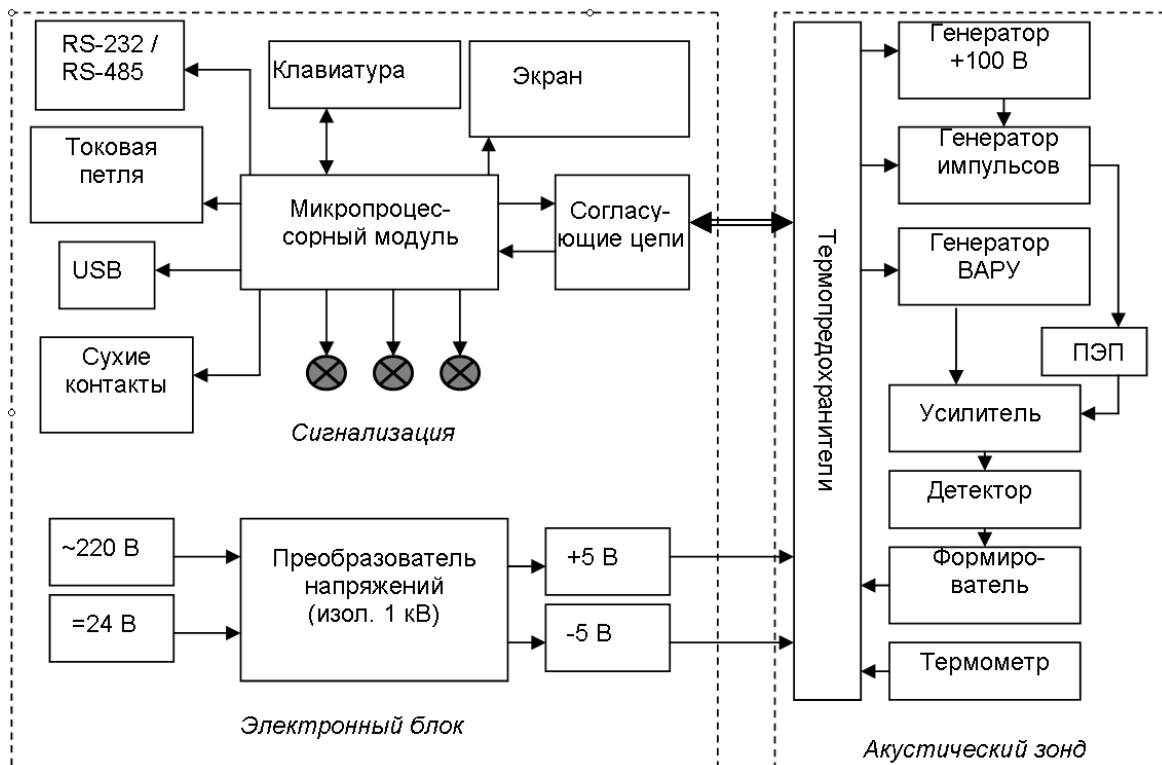


Рис. 3. Блок-схема АУЗУР-02

Каждый акустический зонд, кроме ПЭП, содержит печатную плату с аналоговыми цепями. Конструктивно зонд представляет собой герметичную металлическую коробку с отдельной секцией под печатную плату и секцией для размещения подпружиненного ПЭП. Взрывозащита класса IExIIм обеспечивается компаундированием печатной платы и токоведущих выводов ПЭП; дополнительно входы печатной платы защищены термопредохранителями. Запуск рабочего цикла зондирования производится по внешнему сигналу, поступающему с электронного блока. Высокое напряжение (100 В) формируется с помощью интегральных DC-DC-преобразователей AIMTEC из входного питающего напряжения 5 В. Высоковольтный импульс возбуждения ПЭП формируется двухтранзисторным каскадом (BC817 и IRFD220). Сигнал временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) позволяет подавить импульсы в ближней зоне, возникающие из-за прихода на усилитель сигналов, обусловленных многократными переотражениями в стенке. Приемный тракт и согласующие цепи выполнены на микросхемах Analog Devices (AD8330, AD8361, AD8132, ADM485). В качестве термометра используется датчик температуры AD22100, размещенный так, чтобы обеспечить температур-

ный контакт с корпусом. Зонд крепится на емкость с помощью металлических ленточных стяжек или на магнитах, обеспечивающих усилие отрыва не менее 100 кг.

Следует отметить, что в процессе опытной эксплуатации партии приборов выявились две основные проблемы, влияющие на качество эхо-сигнала и, в конечном счете, на качество измерений. Первая связана с необходимостью горизонтирования акустического зонда в нижней точке емкости. Практика показала, что горизонтировать сам зонд неудобно, особенно в случае емкостей, находящихся в грунте. Для этого была разработана установочная площадка, которая выставляется по горизонтали с необходимой точностью, закрепляется стяжками или магнитами, а затем к ней крепится корпус зонда. Вторая проблема связана с необходимостью обеспечения надежного акустического контакта ПЭП со стенкой емкости. Даже тонкая прослойка воздуха, попадающая между ПЭП и стенкой, может привести к полной потере сигнала. Решением проблемы является использование тонкой прослойки силиконового герметика. При установке подпружиненного ПЭП через слой жидкого герметика возникает хороший контакт, который не пропадает при застывании герметика, обеспечивая также дополнительную герме-

тизацию зонда в рабочем положении. Конкретные технические решения изложены в двух заявках на изобретение.

Электронный блок выполняет несколько основных функций. Первая из них – обеспечение электропитания от источника переменного напряжения 220 В и аварийного источника постоянного напряжения 24 В, который автоматически берет на себя электроснабжение при пропадании переменного питающего напряжения. В настоящее время на значительной части ГРС установлены источники бесперебойного питания (ИБП), обеспечивающие длительную работу контрольно-измерительной аппаратуры по линии 220 В при отключении внешнего электроснабжения. Однако канал 24 В все же оставлен для применения на объектах, где ИБП не установлены. Для получения питающих напряжений применяются преобразователи AC-DC и DC-DC производства AIMTEC, обеспечивающие необходимую развязку выхода от входа (до 4 кВ) и низкий уровень импульсных помех.

Основной частью электронного блока является микропроцессорный модуль, выполненный на управляющем микропроцессоре (УМП) MSP430F169 и сигнальном процессоре (СП) TMS320VC5509. УМП осуществляет обслуживание пленочной клавиатуры и экрана, хранение в энергонезависимой памяти установленных параметров, а также хранение управляющей программы СП, у которого нет собственной энергонезависимой памяти, а также управление коэффициентом усиления акустических зондов и измерение температуры. СП осуществляет запуск рабочего цикла измерений (сигналы запуска поступают на зонды через согласующие цепи), управление двухканальным 12-разрядным АЦП для приема информации с акустических зондов, обработку сигналов и обнаружение первого отраженного импульса, вычисление уровня жидкости и его пересчет в объем и номинальную массу жидкости. Вычисленные значения передаются УМП для отображения на жидкокристаллическом символьном дисплее 2×20. Кроме того, полученные данные выдаются на оптически развязанный ЦАП для формирования сигнала типа «Токовая петля 4–20 мА», необходимого для подключения прибора к общей системе телеметрии ГРС. В конструкцию прибора заложена также возможность передачи информации по каналам последовательных интерфейсов RS-232 и RS-485, однако данная возможность практически не используется, так как ГРС не оснащены достаточным числом

цифровых линий передачи информации на диспетчерский пункт.

Дополнительная функция прибора – контроль выхода измеренного значения уровня за заданные верхний и нижний пределы. В этом случае, во-первых, загорается соответствующий индикаторный светодиод на передней панели прибора, а во-вторых, замыкается пара «сухих» контактов для управления стандартным каналом аварийной сигнализации. Замыкание контактов реализуется с помощью твердотельного реле с опторазвязкой.

Первоначально предполагалось, что ввод управляющих параметров в память прибора будет осуществляться с помощью 8-кнопочной пленочной клавиатуры. Однако, поскольку в конструкции прибора был заложен канал обмена информацией по USB, оказалось значительно удобнее вводить данные с помощью управляющей программы портативного компьютера. Управляющая программа позволяет, во-первых, одновременно видеть на экране все установленные параметры (тип и размеры емкости, толщину и материал стенки, задержку в ПЭП и др.), управлять усилением и проверять работу температурных каналов, а во-вторых, считывать необработанные данные с акустических зондов и сохранять их на диске компьютера для последующего анализа. Поскольку в настоящее время все службы КИА и телеметрии оснащены компьютерами для настройки различных подсистем автоматики на ГРС, использование данной программы для настройки и контроля работоспособности прибора представляется предпочтительным.

### Заключение

К настоящему времени разработаны и утверждены ТУ на прибор, изготовлена опытная партия приборов, успешно пройдены технические испытания на ГРС и получены необходимые разрешительные документы для эксплуатации данного типа приборов в системах одоризации природного газа на газораспределительных станциях. Документация на освоение серийного производства передана одному из промышленных предприятий Нижегородской области.

Дальнейшее развитие данной работы будет состоять в увеличении числа каналов, которые могут работать с одним электронным блоком, и в переносе части функций УМП в промежуточный электронный блок, интегрированный с акустическим зондом и размещаемый во взрывоопасной зоне. Это позволит уменьшить число

кабельных линий от основного электронного блока к зонду и передавать информацию в цифровом виде, что должно улучшить помехозащищенность прибора.

*Список литературы*

1. Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ, И.В. Антика. М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

2. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. М.: Изд-во стандартов, 1990. 287 с.

3. Справочник инженера по КИПиА / Под ред. А.В. Калиниченко. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 576 с.

4. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.

5. Ковалёв Б. К. Некоторые проблемы одоризации газа // Сборник научно-технических статей «Газ-промаш» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.gazprommash.ru/factory/articles/vestnik\\_st6](http://www.gazprommash.ru/factory/articles/vestnik_st6).

6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979.

7. Ультразвуковой уровнемер АУЗУР-02. Руководство по эксплуатации. Нижний Новгород, 2008.

**ULTRASONIC LEVEL METERS FOR AGGRESSIVE AND TOXIC LIQUIDS IN CLOSED TANKS**

*R.V. Belyaev, V.A. Gribov, A.G. Kirillov, A.V. Kupaev, A.M. Reyman, V.N. Shanin, A.V. Shishkov*

Design principles of ultrasonic level meters for aggressive, combustible and toxic liquids in closed tanks are described. Various measurement methods are compared; technical solutions are described and accuracy estimations for AUZUR devices are given.

*Keywords:* ultrasound, level meters, aggressive liquids, natural gas odorant, sound velocity.