

УДК 534.6

С.А. Найда, канд. техн. наук, Ю.К. Михайлова, С.В. Спасиченко

## Ультразвуковой воздушный уровнемер жидких и сыпучих тел для условий сильной запыленности

Рассмотрены особенности пьезоэлектрических преобразователей с многослойными согласующими покрытиями, которые работают на воздушную среду. В результате применения многослойной конструкции обеспечивается возможность определения уровней до 61 м, а амплитуда колебательной скорости на рабочей поверхности преобразователя достигает такой величины, что становится возможным самоочистить поверхность.

The features of piezoelectric transformers with multi-layered matching coverages which works on an air environment are considered. As a result of a multi-layered construction application a possibility to determin the levels up to 61 mcode is provided, and the amplitude of the swaying speed on the transformer working surface gets such a value that the surface self-wiping becomes possible.

### Введение

Уровнемер ультразвуковой – прибор, предназначенный для измерения высоты уровня жидких и сыпучих тел с помощью ультразвука [1-5]. Действие большинства ультразвуковых уровнемеров основано на измерении распространения ультразвуковых волн в воздухе от преобразователя до контролируемой поверхности и обратно при известной (или измеряемой) скорости звука.

Наибольшее распространение получили эхо-импульсные воздушные уровнемеры. Длительность зондирующих импульсов в них  $\tau_{и}$ , как и в эхоскопах, не должна превышать удвоенного времени распространения ультразвука (УЗ) от преобразователя до контролируемой поверхности при минимальном расстоянии  $L_{\min}$  до этой поверхности:

$$\tau_{и} \leq \frac{2L_{\min}}{c}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в воздухе.

Воздушное зондирование в диапазоне частот 10-200 кГц применяется для сыпучих тел и жидкостей с большим затуханием. Основной источник погрешностей при таком способе измерений заключается в зависимости скорости распространения от температуры воздуха:

$$\alpha = \Delta c / \Delta t = 0,59 \text{ м/с} \cdot ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

при  $\Delta t = 50^\circ\text{C}$  значение  $\Delta c = 0,59 \cdot 50 \cong 30$  м/с составляет 10% от скорости  $c = 340$  м/с. Включение в схему прибора опорного (реперного) канала для компенсации изменения скорости частично исключает эту погрешность. В большинстве случаев реперный канал представляет собой дополнительный преобразователь, установленный на фиксированном расстоянии  $l$  от реперного отражателя, т.е. в пределах мертвой зоны, обычно  $l = 0,5$  м. При этом, естественно, остается погрешность, обусловленная наличием градиента скорости УЗ по высоте емкости.

Существенное затруднение представляет создание эффективных излучателей ультразвука для газовой среды. Удовлетворительного согласования с акустическим импедансом среды в случае пьезоэлектрических преобразователей удается достичь с использованием изгибных мод колебаний излучающего элемента. Приемники, как правило, тоже применяют пьезоэлектрические.

Для случая совмещенного преобразователя важным фактором является отношение принятого сигнала к уровню помех (шумов). Это отношение ограничивает возможности уровнемера, диапазон его работы и мертвую зону, где сигнал не может быть принят из-за большой амплитуды послезвучания датчика. Обычно зона составляет 0,5 м при добротности акустических датчиков  $Q \cong 50$ . Длительность зондирования определяется необходимостью иметь 10-20 колебаний высокой частоты в канале радиоимпульса ( $\tau_{и} = (10 - 20)T$ ). Тогда при частоте 50 кГц ( $T = 20$  мкс) получаем требуемую длительность 0,2-0,4 мс.

Уровень помех в основном определяется сигналом от излучателя к приемнику по фланцу датчика с двумя преобразователями, а также уровнем шумов и вибраций, воспринимаемых датчиком извне при креплении его на фланце. С этой точки зрения диапазон 45-50 кГц более предпочтителен, чем 20 кГц, где еще велик уровень индустриальных помех. С другой стороны, согласно требованию стандартов, диапазон разрешенных частот с точки зрения отсутствия помех для радиоприема составляет  $22 \pm 1,65$  кГц;  $44 \pm 4,4$  кГц. Применение 50 кГц ограничивало расстояние 25м при допустимом ослаблении  $n_{\alpha} = 10$ .

Наличие давления в контролируемой емкости, влияние ее стенок, необходимость измерения слоя жидкости, состава газа и температуры предъявляют к уровнемерам более жесткие требования, как к конструкции акустических датчиков, так и к построению электронных схем. Считалось, что для эксплуатации в промышленных условиях наиболее приемлемой конструкцией акустического датчика для измерения и приема ультразвуковых колебаний в воздухе (газе) является “пьезоэлектрический преобразователь с преобразованием поршневых толщинных колебаний в изгибные с применением согласующих крышек резонаторов и рупоров”. Механизм такого преобразования автор [4] не раскрывает.

Целью настоящей работы явилось анализ возможности создания пьезопреобразователей с изгибной модой колебаний, которые для согласования с воздушной средой используют многослойные покрытия, и получение расчетных соотношений для таких покрытий.

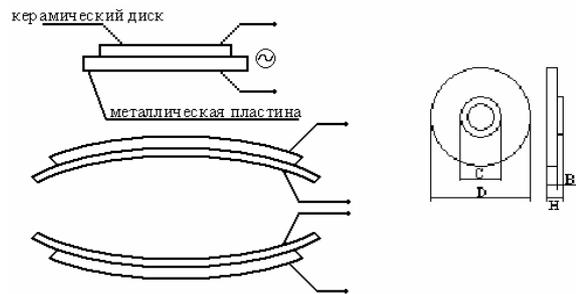
**1. Обзор современных бесконтактных уровнемеров**

В настоящее время в России выпускается датчик уровня акустический ЭХО-5 [11]. Основной акустического преобразователя (АП) является пьезокерамический диск, работающий в режиме изгибных колебаний. Внутри корпуса АП из сплава АМГ, представляющего собой цилиндр с внутренней и внешней резьбой, размещается электроакустический вибратор, состоящий из двух склеенных между собой пьезоэлектрических дисков. Вибратор крепится при помощи прижимной гайки. Перед вибратором со стороны излучения при помощи резьбового соединения устанавливается перфорированный экран – специальное акустическое согласующее устройство, хорошо известное в звукотехнике.

Для концентрации акустической энергии к корпусу АП при помощи резьбового соединения крепится конический рупор.

Пьезокерамические диски склеены так, что

направления их осей встречные. В этом случае направления поляризации дисков при совместном изгибе одинаковые и на внешних гранях парного элемента возникают заряды противоположного знака. Этот вариант биморфного элемента использовался ранее и в микрофонах [12]. В настоящее время существует более простой вариант: керамический диск на тонкой металлической пластинке. Так, например, Американский институт радиоинженеров предлагает ультразвуковые преобразователи, принцип действия которых виден из рис.1, а параметры приведены в табл. 1,2.



**Рис. 1. Схема преобразователя на основе биморфного элемента: материал колеблющейся пластины – латунь**

В НИТЦ биотехнических систем “Сонар” МНПП “Элхим” НАН Украины разработан ультразвуковой уровнемер с рупором “Луч-1” [7]. Уровнемер предназначен для измерения уровня заполнения технических емкостей жидкими и сыпучими веществами (нефть и нефтепродукты, вода и водные суспензии, химические реагенты – щелочи, кислоты, растворы солей, жидкости с повышенной радиоактивностью, порошки металлов и минералов, зерно, мука, молоко и т.д.). Основные технические характеристики: диапазон измерения уровней: 0...10 м; зона нечувствительности: ≤0,5 м; погрешность измерения уровня: 1,5%. Отметим, что малые диапазоны измерений уровней связаны с малыми размерами преобразователей и, естественно, большой расходимостью звукового луча, а также большим затуханием в газах и мучной пыли.

**Таблица 1. Узкополосные преобразователи**

	$f_{рез}, \text{кГц}$	$D, \text{мм}$	$C, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$H, \text{мм}$
APC 502428A	2,8±0,5	50	25	0,2	0,43
APC 150880A	0,8±0,5	15	11	0,2	0,33
APC 120685A	8,5±0,5	12,5	9,5	0,1	0,23

**Таблица 2. Широкополосные преобразователи**

	$f_{рез}, \text{кГц}$	$D, \text{мм}$	$C, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$H, \text{мм}$
APC 416009A	0,75–20	41	25	0,1	0,23

Семейство УЗ датчиков уровня Nivosonar SS-200 (SB-200, ST-200) [10] предлагается фирмой Nivelco (Венгрия) для измерения уровней с высокой точностью в закрытых и открытых баках, хранилищах и силосах, содержащих жидкость и пылевидные материалы (табл.3).

В чувствительном элементе SB-200, ST-200 установлен полупроводниковый датчик температуры, а в SS-200 – термодатчик с терморезистором Pt-100.

У датчиков SS-200, предлагаемых для жидкостей, часть датчика, опущенная в бак, изготовлена из пластмассы, стойкой против коррозии и химикалий (полипропилен, ПВДФ). У датчиков, изготовленных для гранулянтов и пылевидных материалов, покрытие головки изготовлено из полипропиленовой и полиэтиленовой губки, или пенополипропилена и пенопласта. В техническом паспорте SB-200, ST-200 эти материалы ошибочно называются материалами чувствительного элемента.

**Таблица 3. Параметры преобразователей фирмы Nivelco серии Nivosonar**

Частота, кГц	60	40	20	17
Угол излучения, °	5...15	5...15	7...20	5...15

Значительно более широкие возможности имеют бесконтактные ультразвуковые преобразователи фирмы Milltronics (Канада).

Преобразователи серии ST (standard) (табл.4) предназначены для измерения в диапазоне до 30 м, не требуют техобслуживания, имеют различные варианты покрытия для применения во влажных, сухих, агрессивных, запыленных и имеющих высокую степень поглощения средах. Преобразователи имеют длительный срок службы.

Особенности:

- возможность работы при температуре до 150°C;
- имеется исполнение для использования во взрывоопасной зоне;
- приборы полностью герметичны и имеют возможность самоочистки в сильно загрязненных условиях.

Преобразователем является пьезокерамический цилиндр с многослойным согласующим покрытием, совершающий толщинные колебания. Воспользуемся известной формулой [12] для угла звукового пучка на уровне давления -3 дБ:

$$\alpha_{3дБ} \cong 58^\circ \lambda_B / D, \text{ откуда } D \cong 58^\circ \lambda_B / \alpha^\circ,$$

где  $\lambda_B = v_B / f$ ,  $v_B = 340$  м/с – скорость звука в воздухе. Рассчитанные значения  $D$  приведены в этой же табл.4.

Преобразователи серии ST аналогичны преобразователям приборов типа УКБ (Кишинев, АО "Интроскоп"), которые эффективно используются в практике УЗ контроля качества изделий из полимерных материалов. Так прибор УКБ-1М оснащен пьезоэлектрическими преобразователями на частоты 25, 60, 100 и 150 кГц. Приставка к нему П-1М оснащена преобразователями на частоты 40 и 200 кГц. Портативный УЗ прибор типа ЧК-10П относится к приборам нового поколения, оснащен преобразователями на частоты 25, 60, 100 и 150 кГц. Оснастил НЧ преобразователи согласующими слоями, их можно использовать в качестве уровнемеров. Следует иметь в виду, что пенопласты относятся к материалам с большим затуханием УЗ. Что касается длительности импульсов этих приборов, то она мала для очистки их от влаги и пыли при работе на воздух.

Рассмотрим теперь преобразователи серии LR (long range) (табл.5), которые обеспечивают максимальную передачу акустической энергии и гарантируют эффективную работу в диапазонах до 61м в самых сложных применениях и во всех отраслях промышленности. Режим акустической вибрации позволяет работать без техобслуживания в условиях высокой запыленности, турбулентности паров и электромагнитных помех.

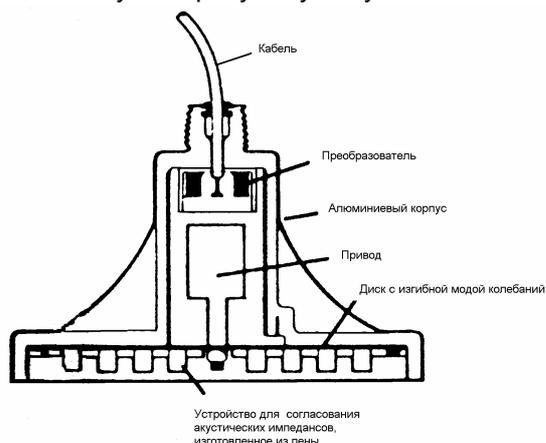
Кроме обычного применения для твердых (сыпучих) материалов (уголь, мука, зерно, цемент и т.д.), LR преобразователи могут быть применены в особенных случаях, например, для определения местоположения локомотива, вагона, корабля в доке; для измерения и управления уровнем руды в бункерах в подземных (наземных) условиях.

Особенности:

- высокая эффективность. Сравнительные испытания показывают, что эти преобразователи от 14 до 400 раз более эффективны по сравнению с обычными акустически согласованными типа конического поршня или отражательного типа;
- узкий угол излучения 5,5° при давлении –3 дБ для максимальной концентрации УЗ энергии;
- боковое акустическое излучение имеет уровень –19 дБ;
- низкое значение "мертвой зоны" 0,9 м;
- не боятся пыли и обладают свойствами самоочистки.

Конструкция преобразователей серии LR представлена на рис.2 [8]. Обратим внимание на то, что изгибные колебания диска возбуждаются с помощью привода, скрепленного с диском в его центре. В результате отражения от окружности

закрепления диска в корпусе в нем возникает стоячая в радиальном направлении волна, в которой смещения и скорости в смежных пучностях имеют противоположные знаки. Поэтому излучение в тыльную сторону отсутствует.



**Рис. 2.Схема преобразователя фирмы Milltronics серии LR**

С фронтальной стороны эффективность излучения увеличивается в результате наложения определенным образом многослойного материала, согласующего акустические импедансы. Разработанная и запатентованная Milltronics многослойная система и обеспечивает возможность определения уровней до 61м.

Следует отметить еще одно преимущество преобразователя типа LR перед ST с такой же частотой и расходимостью, которое не отмеча-

ется в [8,9]: он значительно легче из-за отсутствия цилиндра из пьезокерамики. Поэтому может подвешиваться на кабеле, что приводит к значительному уменьшению акустических помех по фланцу, а следовательно, увеличению отношения сигнал–шум.

Пьезопреобразователи с изгибной модой колебаний тоже должны обладать указанным преимуществом. Однако, в случае больших диаметров, препятствием для этого является возбуждение, аналогично громкоговорителям [14], высокочастотных колебаний и падение эффективности излучения. Один из путей устранения паразитных колебаний используется при создании пьезоэлементов УЗ сканеров: разбиение элемента на электрически соединенные, но акустически изолированные пьезоэлементы. Правда, и используются не изгибные, а толщинные колебания.

Чтобы полезными были изгибные колебания и в тоже время низкочастотные, необходимо изменить способ возбуждения. Этот вариант исследовался при решении задачи создания узконаправленного пучка для дефектоскопии пластмасс. Они также, как и газы, имеют большое затухание УЗ и поэтому к ним предъявляются такие же требования, как и к воздушным уровням. Направленный пьезопреобразователь обычно набирается из прямоугольных пластин из анизотропной пьезокерамики, которые располагаются на круговой базе (рис.3).

**Таблица 4. Параметры преобразователей фирмы Milltronics серии ST**

Тип	Частота, кГц	Макс. диапазон, м	Угол излучения, °	Диаметр преобразователя, мм
ST25C... (P,V,T,ST)	41,5	7,6	12	40
ST50V... (P,V,T)	41,5	15,2	5	96
ST100A... (P,V)	21	30,5	7	135

**Таблица 5. Параметры преобразователей фирмы Milltronics серии LR**

Тип	Частота, кГц	Макс. диапазон, м	Угол излучения, °	Температура, °С	Диаметр преобразователя, мм	Диаметр фланца, мм
LR-21	21	30	5,5	-40 +77	172	267
LR-13	13	61	5,5	-40 +77	268	356

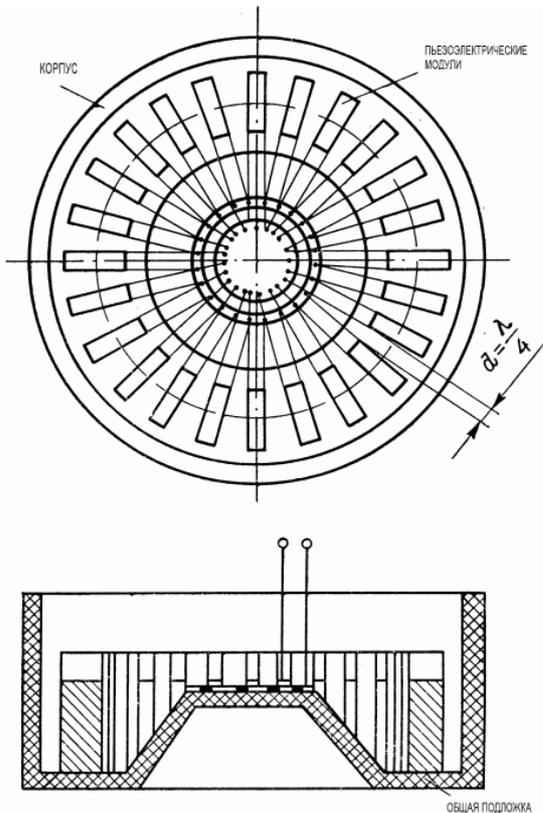


Рис.3. Схема направленного преобразователя

В большинстве случаев размеры УЗ преобразователей соизмеримы с длиной волны звука в исследуемом материале. Излучаемая ими звуковая энергия не распределяется во всех направлениях одинаково, т.е. существует направление, в котором создается максимум излучения. Последний создается по осевому направлению, совпадающему с направлением нормали к излучающей поверхности. В качестве единичного пьезоэлемента берется прямоугольная тонкая пластина, вырезанная из кристалла сегнетовой соли, дигидрофосфата аммония z-среза, дигидрофосфата калия. Причем размеры сторон пластинки выбраны так, что выполняется условие кратности частот первой и второй мод контурных колебаний, а упругий излученный импульс каждого элемента имеет длительность, равную одному периоду частоты первой моды колебаний. Если преобразователь набран из прямоугольных пластинок дигидрофосфата аммония, стороны которых равны соответственно 4 и 2 см, а толщина 0,2 см, то первая, вторая и третья моды колебаний будут иметь частоты  $f_1 = 39,7$  кГц,  $f_2 = 79,4$  кГц,  $f_3 = 100$  кГц. При импульсном возбуждении электрическим импульсом П-формы, если в спектре импульса присутствуют частотные составляющие, равные  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ , то пластина колеблется на трех своих резонансных частотах. Исключение из спектра возбуждающего им-

пульса частоты  $f_3$  ( $\tau = 1/f_3$ ) приводит к возбуждению  $f_1$  и  $f_2$ ; частоты  $f_2$  ( $\tau = 1/f_2$ ) – частот  $f_1$  и  $f_3$ ;  $f_1$  ( $\tau = 1/f_1$ ) – частоты  $f_3$ . При возбуждении гармоническим сигналом, естественно, возбуждаются только частоты, совпадающие с одной из частот  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ .

## 2. Многослойный двумерный согласователь

Напомним, что техника двумерного согласования в литературе не рассматривалась, а была запатентована фирмой Milltronics. Рассмотрим режим излучения. Известно [13], что влияние среды, окружающей мембрану, зависит прежде всего, от того, происходит ли распространение волн в среде быстрее или медленнее, чем распространение изгибных волн в самой мембране. Если средой является воздух, то случай, когда  $v_{cp} \ll v_{mb}$ , практически встречается редко, но расчет установившегося движения при этом нетруден.

В случае  $v_{cp} \gg v_{mb}$  эффективность движения одной части поверхности быстро передается через среду и влияет на другие участки, так что в пределе реакция среды однородна по всей мембране и пропорциональна среднему смещению  $\bar{y}$ .

Однако, даже в случае тяжелой мембраны влиянием среды в первом приближении можно пренебречь. Это, тем более, можно сделать в случае пластины (диска).

Наиболее просто сделать диск излучающим можно, закрыв через одну кольцевые зоны между узловыми диаметрами акустическими экранами, расположенными от диска на небольшом расстоянии. Тогда незакрытые зоны, колеблющиеся в фазе, будут действовать как поршень и излучать звук в среду. Правда, интенсивность излучения в воздух из-за большой разницы акустических импедансов диска и воздуха будет малой. Увеличить ее можно, наклеив на излучающие зоны четвертьволновые слои с промежуточным значением импеданса. Однако, такая система негерметична и непригодна для работы в сильно запыленной среде.

Решение проблемы состоит в следующем. На весь диск наклеивается пенопласт с канавками, глубина которых такая, что разность фаз колебаний, распространяющихся по пенопласту и воздуху равна  $\pi$ . Это условие можно записать в виде

$$l = \frac{\lambda_B}{2} \frac{1}{1 - v_B/v_n}, \quad (3)$$

где  $v_B$ ,  $v_n$  – скорости распространения звука в воздухе и пенопласте соответственно. Выбрав толщину пенопласта по дну канавки равной  $\lambda_n/4$  и полагая

$$l = n\lambda_n/2, \quad (4)$$

чтобы оба пути звука в пенопласте были нечетно кратны  $\lambda_n/4$ , получим трансформацию колебательной скорости от угла на излучающую поверхность пенопласта. С учетом (3) условие (4) принимает вид:

$$\frac{v_n}{v_B} = \frac{1+n}{n}. \quad (5)$$

Пусть, например,  $f = 13$  кГц ( $\lambda_B = 2,62 \cdot 10^{-2}$  м) и  $n = 1$ , тогда  $\lambda_n = 5,25 \cdot 10^{-2}$  м,  $\lambda_n/4 = 1,31 \cdot 10^{-2}$  м,  $\lambda_n/2 = 2,62 \cdot 10^{-2}$  м. Таким образом толщина пенопласта по дну канавки равна 1,3 см, а общая – 3,9 см;  $v_n = 2v_B = 680$  м/с. Близким значением скорости продольных волн  $v_n = 850 \pm 10$  м/с обладает, например, пенополиуретан ППУ-3 с объемным весом  $\rho = 2,00$  кг/м<sup>3</sup> (для воздуха  $\rho_a = 1,22$  кг/м<sup>3</sup>). Однако, применение только одного четвертьволнового согласующего слоя, представляющего в месте контакта с ним пластины удель-

ную акустическую нагрузку  $z_{вх} = \frac{z_{сл}^2}{z_B} = 69 \cdot 10^6$  Па·с/м, создает торможение диска.

В датчиках серии ST, в которых преобразователем является пьезокерамический цилиндр, применяется многослойное согласующее покрытие. Слои пенопласта располагаются в порядке убывания  $z$  от преобразователя к воздуху. Известно, что входной импеданс двух слоев с  $z_1 > z_2 > z_B$ , нагрузкой которых является воздух, равен

$$z_{вх} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 z_B. \quad (6)$$

В результате трансформации колебательной скорости в слоях ее амплитуда на рабочей поверхности достигает такой величины, что становится возможным самоочищение поверхности. Учтя, что  $L_{min} = 0,9$  м для LR, получаем согласно (1)  $\tau_{и} \leq 5,3$  мс.

Для частоты 13 кГц ( $T = 7,8$  мкс) это составляет  $f \cdot \tau_{и} = 69$  периодов, тогда как для измерения достаточно всего (10–20) периодов, т.е. в 3–7 раз меньше. Такое превышение дли-

тельности импульса необходимо для “встряхи-вания” пыли или конденсированных на поверхности паров жидкости.

## Выводы

Рассмотрены особенности разработки системы многослойного согласования преобразователя с воздухом. Наличие такой системы позволяет определять уровни до 61 м. Кроме того, преобразователь становится пылезащищенным со способностью самоочищения своей рабочей поверхности.

## Литература

1. *Радж Балдев*, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. -576 с.
2. *Шарапов В.М.*, Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики/ Под ред. В.М.Шарапова. М.: Техносфера, 2006.-632 с.
3. *Ультразвук*. Малая энциклопедия/ Под ред. А.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
4. *Бабинов О.И.* Контроль уровня с помощью ультразвука. -М.: Энергия, 1971, – 98 с.
5. *Бабинов О.И.* Ультразвуковые приборы контроля.– Л.: Машиностроение, 1985. – 117 с.
6. *Носов В.П.* Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1972 – 288 с.
7. *Ультразвуковой* уровнемер “Луч-1”. НАН Украины, Научный и инженерно-технический центр биотехнических систем “Сонар”, МНПП “Элхим”. Проспект.
8. *Milltronics*. Non-contacting ultrasonic transducers. Проспект.
9. *Milltronics*. Guide to simplified process measurement. Проспект.
10. *Нивосонар* SS-200, ST-200. Семейство ультразвуковых измерителей и дистанционных датчиков уровня. Технический паспорт. Производитель Нивелко, Будапешт.
11. *Датчик* уровня акустический ЭХО-5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
12. *Вахитов Я.Ш.* Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1982. – 415 с.
13. *Морз Ф.* Колебания и звук. М. –П.: Гостехиздат, 1949. – 496 с.
14. *Алдошина А.*, Войшвилло А.Г. Высококачественные акустические системы и измерители. М.: Радио и связь, 1985. – 168 с.