

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова»



## **ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА – 2012**

Сборник материалов  
II Всероссийской научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых,  
с международным участием,  
посвященной 60-летию Ижевского государственного технического  
университета имени М.Т. Калашникова

Ижевск, 14–16 мая 2012 года

Ижевск  
Типография «А4»

УДК 620.179  
ИЗ7

**Редакционная коллегия:**

*Г.В. Ломаев*, д.т.н., проф. (гл. редактор); *С.А. Мурашов*, к.т.н., ст. преп.  
(зам. гл. редактора); *Л.В. Волкова*, аспирант, вед. спец.

**Научные рецензенты:**

*В.А. Тенев*, д.ф.-м.н., профессор; *В.В. Муравьев*, д.т.н., профессор;  
*Г.В. Ломаев*, д.т.н., профессор; *А.И. Нистюк*, д.т.н., профессор;  
*В.К. Барсуков*, к.т.н., профессор

ИЗ7

**Измерения, контроль и диагностика – 2012** : сб. материалов II Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, с междунар. участием, посвященной 60-летию Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, 14–16 мая 2012 года). — Ижевск : А4, 2012. — 380 с. : ил.

ISBN 978-5-9904140-1-3

В сборнике представлены статьи и тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Измерения, контроль и диагностика – 2012», проходившей в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова 14–16 мая 2012 г. Рассматривается широкий круг вопросов измерения, контроля и диагностики в области физико-математических наук, приборостроения и оптоэлектроники, электронной техники, радиотехники и связи, информатики и вычислительной техники, энергетики и электротехники, безопасности жизнедеятельности, природообустройства и защиты окружающей среды.

Статьи адресованы аспирантам, студентам и представителям предприятий и организаций, заинтересованных в разработках молодых ученых.

УДК 620.179

ISBN 978-5-9904140-1-3

© ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», 2012

описанных в [1]. Длина базы прозвучивания проволоки была выбрана в размере 0,25 м, рабочая частота 1 МГц что соответствует незначительному затуханию и минимальной области дисперсии скорости.

*Работа выполнена при поддержке программы инициативных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в Учреждении УрО РАН в 2012–2014 гг. (регистрационный номер: 12-У-2-1013) и в соответствии с разделом 2 мероприятий Программы стратегического развития университета на 2012–2016 гг.*

### Список литературы

1. *Муравьев В.В.* Влияние напряженно-деформированного и структурного состояния в проволоках на основные закономерности распространения стержневой волны Похгаммера / В.В. Муравьев, О.В. Коробейникова, А.В. Платунов. // Известия ВУЗов. Черная металлургия, № 10, 2009. – С. 44–48.

УДК 681.883.9

*Г.А. Полянкин*, зав. лабораторией

E-mail: [grig@udsu.ru](mailto:grig@udsu.ru)

Удмуртский государственный университет

Научный руководитель: *О.В. Муравьева*, д.т.н., профессор Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова

### **Моделирование и разработка бесконтактного эхолокационного ультразвукового датчика уровня**

Современные автоматизированные системы контроля технологических процессов требуют точных надежных устройств для измерения уровня (расстояний). Использование датчиков уровня позволяет повысить стабильность техпроцессов и качество готовых продуктов, снизить цену изделия и количество отходов. Существует широкий спектр таких датчиков, построенных на основе порядка 20 измерительных принципов. Выбор датчика уровня, оптимально подходящего для решения определённой задачи, зависит от условий установки, целей измерения, свойств среды измерения или условий окружающей среды, совместимости физического принципа работы датчика с решаемой задачей измерения. Например, ультразвуковые (УЗ) датчики уровня, использующие принцип УЗ эхолокации (рис. 1), позволяют измерять расстояния от нескольких сантиметров до десятков метров при управлении технологическими про-

цессами и объектами на расстоянии (индикация содержимого движущихся контейнеров, подсчёт объектов, предотвращение столкновений козловых кранов, автомобилей, автоматическая остановка мостовых кранов и т.п.). Точность определения расстояния, главным образом, зависит от точности отсчёта времени прохождения ультразвукового импульса до объекта и обратно, на которую в свою очередь влияет крутизна переднего фронта, длительность и частота повторения импульсов, амплитуда коэффициента усиления усилителя [1].

Однако, по причине сильного затухания ультразвука в атмосфере, особенно в области высоких частот, и больших потерях на границах раздела преобразователь – воздух, использование УЗ датчиков не всегда эффективно. Существующие изгибные пьезопреобразователи [2], работающие на частотах до 50 кГц, хорошо согласованы с воздухом, но имеют широкую диаграмму направленности, что снижает их разрешающую способность. Кроме того они являются высокодобротными, что снижает точность эхолокации. Также для таких датчиков необходим повышенный уровень помехозащищенности, т.к. источниками помех в этом диапазоне частот могут быть работающие поблизости пневмосистемы, компрессоры, утечки сжатого воздуха, электросварка, электродвигатели со щеточными контактами и т.д., причем помехи могут передаваться и через корпус преобразователя. С другой стороны, ослабление амплитуды УЗ волны, обусловленное ее расхождением, уменьшается с увеличением частоты излучения. Таким образом, актуальной представляется разработка широкополосного низкочастотного преобразователя, эффективно излучающего (принимающего) УЗ волны в воздушной среде.

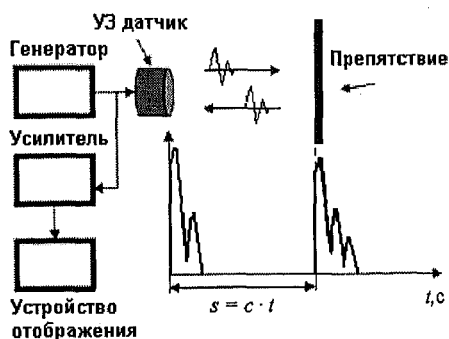


Рис. 1. Принцип ультразвуковой эхолокации

Разработка УЗ средств диагностики и контроля с использованием воздушной среды в качестве переходной, базируется на выборе:

а) оптимального диапазона частот, в котором ослабление амплитуды УЗ волны, обусловленное затуханием и расхождением, минимально, а для увеличения эффективности излучения (приема);

б) оптимального способа согласования преобразователя с окружающей средой по волновому сопротивлению.

Для выбора оптимальной частоты рассчитаем акустический тракт преобразователя. Известно [3], что амплитуда сферической волны  $U(r)$  ослабляется с расстоянием  $r$  по закону:

$$U(r) = U_0 \Phi(r) \cdot e^{-\delta \cdot r} \quad (1)$$

$$\Phi(r) = \frac{a}{r + a} \quad (2)$$

где  $a$  – это расстояние до эффективного акустического центра излучателя (рис. 3);  $\delta$  – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания в газах пропорционален квадрату частоты  $f$ :

$$\delta = \alpha \cdot f^2, \quad (3)$$

где  $\alpha = 1,24 \cdot 10^{-11} \text{ с}^2/\text{м}$  – для воздуха.

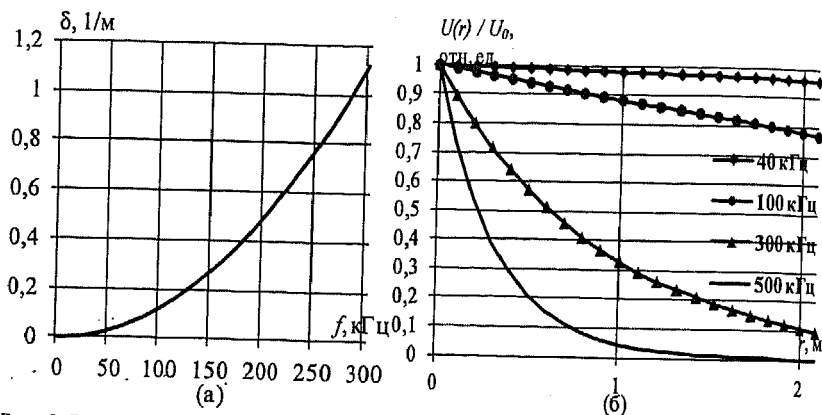


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания от частоты (а); изменение амплитуды волны  $U(r)$  от расстояния  $r$ , вследствие затухания (б)

На рис. 2 представлены результаты расчета зависимости коэффициента затухания от частоты и ослабление амплитуды волны  $U(r)$ , обусловленное затуханием. Так, для волны, распространяющейся с частотой

500 кГц, амплитуда уменьшается в 22 раза на расстоянии 1 м, для 300 кГц – в 3 раза, для 100 кГц – в 1,13 раза, для 40 кГц – на 2 %.

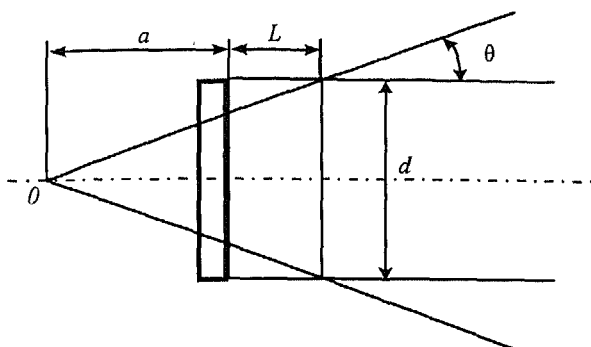


Рис. 3. Акустическое поле дискового излучателя, где  $\theta$  – угол раскрытия основного лепестка диаграммы направленности,  $L$  – зона Френеля

Для оценки влияния расхождения на амплитуду распространяющейся в среде волны, рассчитаем расстояние до эффективного акустического центра излучателя  $a$ , которое выражается через параметры звукового поля излучателя [3]:

$$a = \frac{d}{2 \cdot \operatorname{tg}(\arcsin \frac{1,22 \cdot C}{f \cdot d})} - \frac{d^2 f}{4 \cdot C} \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр излучателя,  $f$  – частота излучения,  $C$  – скорость распространения УЗ в среде.

На рис. 4,а представлена зависимость  $\Phi(r)$  от расстояния для излучателя диаметром 0,03 м на рис. 4,б представлена зависимость амплитуды распространяющейся волны от затухания и расхождения, как результата их совместного влияния.

Сравнивая зависимости на рис. 2,б и рис. 4,а, можно отметить, что при росте частоты излучения наблюдается уменьшение амплитуды волны, вследствие ее затухания, а если рассматривать зависимость амплитуды от расхождения, наоборот, увеличение. Таким образом, можно определить оптимальный диапазон рабочих частот, в котором, при заданных параметрах, ослабление амплитуды будет наименьшим.

Из результатов, представленных на рис. 5 видно, что для определения расстояний до 1,5 м в воздухе предпочтительнее диапазон частот (200...300) кГц.

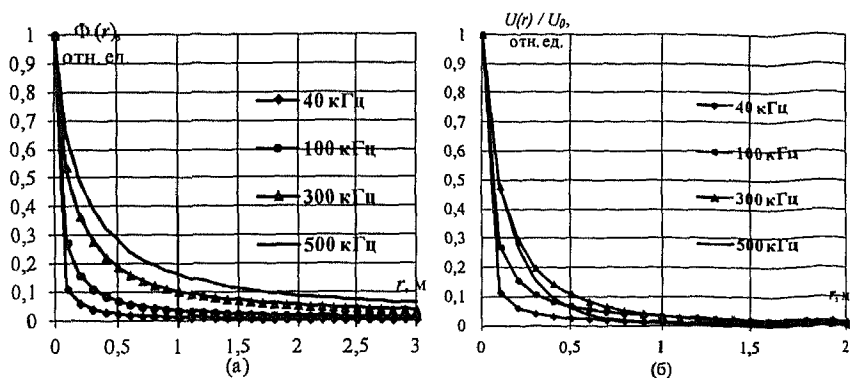


Рис. 4. Ослабление амплитуды волны, обусловленное: расхождением (а); совместным влиянием затухания и расхождения (б)

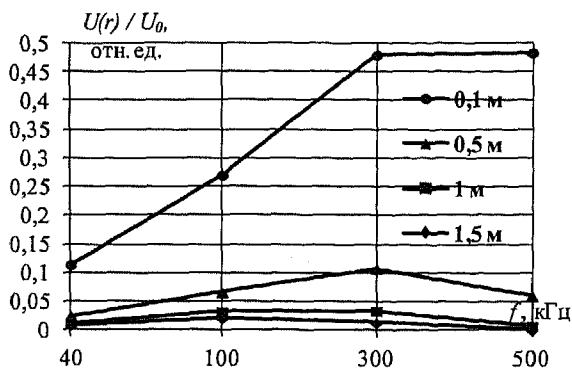


Рис. 5. Зависимость амплитуды волны от частоты излучения на разных расстояниях

Рассмотрим возможность согласования пьезопреобразователя с воздушной средой. Из теории тонких плёнок известно, что коэффициент прозрачности слоя, разделяющего две среды, при произвольных углах падения плоской волны, для гармонического режима [4]:

$$D = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 - Z_2) \cdot (Z_2 - Z_3) \cdot e^{ik_2 z h} + (Z_1 + Z_2) \cdot (Z_2 + Z_3) \cdot e^{-ik_2 z h}}, \quad (5)$$

где  $Z_i = \frac{\rho_i C_i}{\cos \theta_i}$  – волновое сопротивление  $i$  среды;  $\rho_i$  – плотность  $i$  среды;  $C_i$  – скорость в  $i$  среде;  $\theta_i$  – угол падения в  $i$  среде;  $h$  – толщина слоя;  $k_{2z} = \frac{2\pi f}{C_2} \cdot \cos \theta_2$  – волновое число во втором (согласующем) слое.

При отсутствии согласующего слоя, для случая нормального падения волны на границу раздела двух сред, имеем:

$$D = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_3)} \quad (6)$$

Таким образом, для границы пьезоэлемент ( $Z_3 = 24,5 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) – воздух ( $Z_1 = 430$  кг/(м<sup>2</sup>·с)) коэффициент прозрачности  $D_{31} = 0,000035$ , т.е. через границу проходит лишь 0,0035 % от амплитуды падающей волны. Если в качестве протектора УЗ датчика использовать эпоксидную смолу ( $Z_3 = 3,24 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с)), то  $D_{31} = 0,00027$ , т.е. проходит 0,027 %.

Применение согласующего слоя толщиной  $h = \lambda_{cc} / 4$ , где  $\lambda_{cc}$  – длина волны в согласующем слое, с волновым сопротивлением  $Z_2$ , отвечающему условию  $Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$  ( $Z_1, Z_3$  – волновые сопротивления окружающих сред), позволяет уменьшить величину потерь на границе раздела двух сред и достичь максимальной прозрачности слоя [4]. Таким образом, для границы эпоксидная смола – воздух, необходимо использовать согласующий слой с волновым сопротивлением  $Z_2 = 0,04 \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Из существующих твердых сред наиболее близкое удельное акустическое сопротивление имеет силиконовый каучук волновое сопротивление которого меняется в пределах  $(0,9 \dots 1,6) \cdot 10^6$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Кроме того, силиконовый каучук обладает малым затуханием ультразвуковых колебаний и высокой износостойкостью.

Для оценки эффективности применения силиконового каучука при согласовании преобразователя с воздухом было теоретически исследовано двойное прохождение ультразвукового импульса через согласующий слой для двух типов границ раздела сред: пьезокерамика (ЦТС-19) – силиконовый каучук – воздух и эпоксидная смола – силиконовый каучук – воздух. Расчет проведен в среде программного обеспечения «Mathcad» по следующей схеме:

- 1) определение переходной характеристики согласующего слоя;
- 2) разложение в спектр зондирующего ультразвукового импульса и спектральный анализ его двойного прохождения через слой;



### 3) восстановление формы ультразвукового эхоимпульса.

В качестве переходной характеристики использована зависимость коэффициента прозрачности  $D$  согласующего слоя от частоты  $f$  ультразвукового сигнала при толщине слоя  $h = const$ .

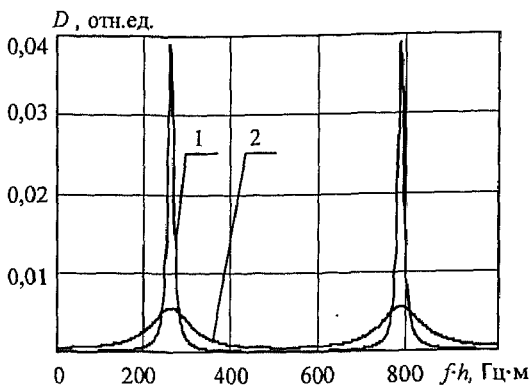


Рис. 6. Зависимость коэффициента прозрачности от частоты излучаемого сигнала  $f$  и толщины согласующего слоя  $h$  для различных границ раздела сред:

- 1) пьезокерамика – силиконовый каучук – воздух
- 2) эпоксидная смола – силиконовый каучук – воздух

Из рис. 6 видно, что применение силиконового каучука позволяет увеличить амплитуду волны, прошедшей через границу пьезокерамика – воздух до 4 %, а через границу эпоксидная смола – воздух до 0,5 %.

Зададим зондирующий импульс в виде затухающей синусоиды  $U(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin \omega t$ , где  $U_0$  – начальная амплитуда колебаний;  $\delta$  – коэффициент затухания;  $t$  – время;  $\omega = \sqrt{(2\pi f_0)^2 - \delta^2}$ ;  $f_0$  – собственная частота пьезопластины. Спектр эхоимпульса  $A(f)$  определяется как произведение спектра зондирующего импульса  $U(f)$  на переходную характеристику согласующего слоя при прямом  $D_{31}(f)$  и обратном  $D_{13}(f)$  прохождении импульса:  $A(f) = U(f) \cdot D_{31}(f) \cdot D_{13}(f)$

На рис. 7 представлены расчетные формы эхоимпульсов для разных границ раздела сред ( $U_{зонд}$  – амплитуда зондирующего импульса,  $U_{пр}$  – амплитуда импульса дважды прошедшего через слой). Видно, что импульсы незначительно отличаясь по амплитуде существенно отличаются по форме и длительности. Так, для границы пьезокерамика – силиконовый каучук – воздух (рис. 7,а) эхоимпульс имеет значительную протяженность во времени и сопровождается медленным нарастанием ампли-

туды (7–10 периодов), что делает невозможным точные измерения времени “прихода” импульса по фронту срабатывания. Такое поведение импульса является следствием большой разницы волновых сопротивлений пьезокерамики и силиконового каучука. В то же время для границы эпоксидная смола – силиконовый каучук – воздух (рис. 7,б) эхоимпульс значительно короче, при этом вследствие низкой добротности, нарастание амплитуды происходит за 1,5–2 периода, что приводит к возможности существенного повышения точности измерения расстояний эхоимпульсным методом. Полученные результаты подтверждены экспериментальными данными и свидетельствуют о возможности повышения эффективности излучения (приёма) УЗ преобразователей в воздушную среду путём использования согласующего слоя из силиконового каучука [5].

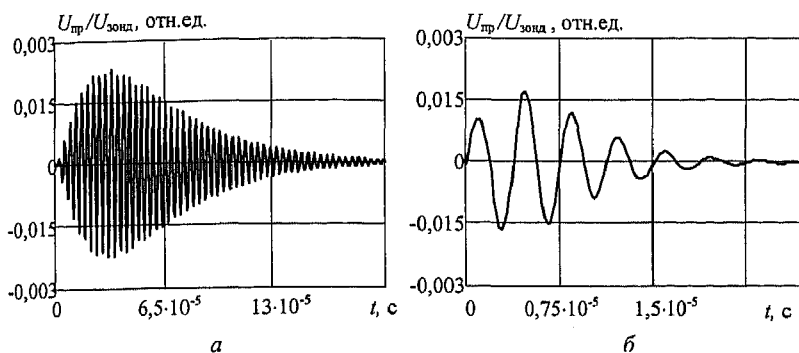


Рис. 7. Форма эхоимпульса для различных границ:

- а) пьезоэлемент – силиконовый каучук – воздух ( $\delta = 6,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}, f_0 = 270 \text{ кГц}$ )  
 б) эпоксидная смола – силиконовый каучук – воздух ( $\delta = 3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}, f_0 = 270 \text{ кГц}$ )

На основании полученных данных был разработан пьезоэлектрический преобразователь (рис. 8,а), предназначенный для излучения УЗ волн в атмосферу, имеющий резонансную частоту  $f_0 = 270 \text{ кГц}$ . В качестве чувствительного элемента используется пакет из 8 пьезокерамических пластин ЦТС – 19 размерами (20×6×0,7) мм, залитых эпоксидным клеем. В качестве согласующего слоя используется четвертьволновой слой из силиконового каучука толщиной  $h = 0,97 \text{ мм}$ . Угол раскрытия основного лепестка диаграммы направленности  $\theta = 3,6^\circ$  (рис. 8,б).

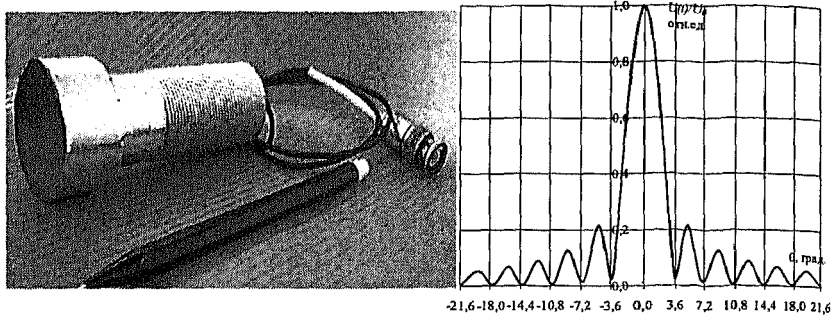


Рис. 8. Фотография УЗ датчика для работы в воздушной среде (а) и его диаграмма направленности (б)

Разработанный преобразователь обладает рядом преимуществ по сравнению с известными аналогами – датчиками расстояний фирм «Balluff» (США) и «Turck» (Германия):

- высокая чувствительность – на расстояниях до 0,3–0,4 м обнаруживается проволока диаметром 0,2 мм (преобразователь фирмы «Balluff» обнаруживает на этих расстояниях проволоку диаметром 3 мм);

- высокая разрешающая способность по угловым координатам и по дальности;

- высокая защищенность от акустических помех, возникающих вследствие утечки сжатых газов, звона металлических предметов, работы электросварки (в 4 раза выше защищенность ближайших по величине диапазона переключений аналогов);

- надежная защита от влияния агрессивных сред, пыли, грязи, влаги за счет применения силиконового каучука, который выполняет роль протектора.

Разработанный преобразователь может быть использован в качестве ультразвукового выключателя, выполняющего следующие функции:

- обнаружение эхоимпульсным методом твердых (отражающих ультразвук) предметов;

- выключение при приближении (или удалении) предмета на заданное расстояние;

- выявление зеркально-теневым методом любых предметов (в том числе поглощающих ультразвуковые волны).

Для УЗ преобразователей, работающих на частотах до 300 кГц, диаграмма направленности волны, отраженной объектом контроля, формируется всей его поверхностью, поэтому поверхность с шероховатостью до 1 мм будет распознаваться как ровная. Также возможен дистанцион-

ный контроль материалов с относительно низким волновым сопротивлением (резина, пластмассы и т.д.), тонких металлических листов, автоматический контроль количеств материально-производственных запасов (бумаги, листового металла, лесоматериала, горной породы) в механизмах загрузки. Благодаря особенностям распространения УЗ в пространственно ограниченных средах, возможна реализация УЗ метода измерения линейных размеров, например, длины труб при доступе к одному из их торцов.

Применение УЗ датчиков предпочтительно там, где требуется широкий диапазон и точность измерений, быстроедействие, широкий диапазон температур, шероховатая или загрязненная отражающая поверхность, но при этом механический контакт с ней недопустим по технологии. В пыльной среде или в среде с конденсатом они зачастую являются единственной альтернативой.

### Список литературы

1. Буденков Г.А., Стрижак В.А., Пряхин А.В., Полянкин Г.А., Коршунов Я.Н., Недзвецкая О.В. Импульсный метод измерения скорости ультразвука // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 3–8.
2. Буденков Г.А., Беглецов Б.Н., Буденков А.Г. Ультразвуковая диагностика с использованием воздуха атмосферы в качестве переходной среды // Дефектоскопия. – 1996. – № 10. – С. 18–29.
3. Клюев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. – Т. 3. – Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
4. Бреховских Л.П. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973.
5. Буденков Г.А., Шишкина С.И., Полянкин Г.А. Согласование ультразвуковых пьезопреобразователей с воздушной средой // Труды IV Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в инновационных проектах», Ижевск, 29–30 мая, 2003 г. – Ч. 4. – С. 92–94.