

УДК 620.179.16+54.1

# Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой.

## Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 24.10.2018

Принята к печати 28.11.2018

Применение поверхностных и подповерхностных волн для контроля изделий с двухслойной структурой позволяет расширить возможности диагностирования физико-механических свойств объектов. Цель работы состояла в установлении условий и выдаче рекомендаций, обеспечивающих измерение скорости и амплитуды упругих мод в защитном покрытии и в основе объекта при одностороннем доступе к его поверхности.

На основе представлений лучевой акустики проанализирован акустический тракт и получены соотношения между геометрическими параметрами объектов, акустической базой прозвучивания, длиной волны упругих мод, количеством осцилляций в импульсе, необходимые для нивелирования акустического шума при акустических измерениях.

Проведено сопоставление данных расчетной модели с опытными данными, предложенными для использования в качестве опорных для определения оптимальных условий измерения скорости упругих мод, амплитуды, спектра сигнала и др. Изучены условия устранения паразитного влияния вращающихся мод на измерения при осевом прозвучивании поверхностной волной цилиндрического объекта.

Проанализирован способ измерений, реализуемый путем прямого и обратного прозвучивания объекта малоапертурными и наклонными преобразователями, и получены выражения для определения скорости подповерхностной волны под защитным покрытием в виде клина. Предложено ультразвуковое устройство для возбуждения-приема поверхностных волн с разной скоростью распространения в объектах (изменяющейся на 20–35 %), использующее для акустического согласования сред металлического звукопровода в виде клина. Изучена возможность нивелирования влияния интерференции в защитном слое на выявляемость дефектов в основе материала объемной волной путем создания опорного эхо-сигнала продольной волны заданной частоты и вводимой нормально к поверхности объекта.

**Ключевые слова:** поверхностные и подповерхностные волны, скорость ультразвука.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

---

**Адрес для переписки:**

Баев А.Р.  
Институт прикладной физики Национальной академии наук  
Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

---

**Address for correspondence:**

Baev A.R.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

---

**Для цитирования:**

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.  
Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта.  
Приборы и методы измерений.  
2018. – Т. 9, № 4. – С. 325–336.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

---

**For citation:**

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V., Zhavoronkov K.G.  
[Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 1. Influence of the Geometrical Parameters].  
Devices and Methods of Measurements.  
2018, vol. 9, no. 4, pp. 325–336 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

# Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 1. Influence of the Geometrical Parameters

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V., Zhavoronkov K.G.

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 24.10.2018

Accepted for publication 28.11.2018

## Abstract

Application of surface and subsurface waves for control of objects with a double-layer structure allows to extend possibilities of diagnostics of their physico-mechanical properties. The purpose of work was to determine conditions and offer recommendations providing measuring of ultrasonic velocity and amplitude of the former modes in protective layers and in basis of object at one-sided access to its surface.

The analysis of an acoustic path of a measuring system in relation to ultrasonic evaluation of the objects having the restricted sizes and the protective coating according to velocity data of the surface and subsurface waves propagation is made. On the basis of representations of beam acoustics the dependences connecting a wavelength of the excited surface and subsurface modes, thickness and width of a controlled object, acoustic base of a sounding are defined. There are to provide a condition leveling of the influence of an acoustical noise created by the reflected and accompanying waves on parameters of acoustic signal with the given quantity of oscillations in an impulse.

The principle opportunity is shown and conditions for determination of velocity of subsurface body waves in the base material which is under a protective coating layer are established. For these purposes on the basis of use of the block of ultrasonic probes the optimum scheme of a sounding is offered and the analytical expression for calculation of required velocity considering varying of thickness of a covering is received.

The method of acoustical measuring realized by a direct and reverse sounding of the objects with small aperture and angle probes was analysed and formulas for determination of speed of subsurface wave under protective layer of the wedge form have been got. An ultrasonic device is suggested for the excitation-reception of subsurface waves with different speed in objects (on 20–35 %) using for the acoustic concordance of environments of metallic sound duct as a wedge. Possibility of leveling of interference in a protective layer to control effects in basis of material by a volume wave by creation of supporting echo-signal of longitudinal wave of the set frequency and entered normally to the surface of object was studied.

**Keywords:** surface and subsurface waves, ultrasonic velocity.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

---

### Адрес для переписки:

Баев А.Р.  
Институт прикладной физики Национальной академии наук  
Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

### Address for correspondence:

Baev A.R.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

### Для цитирования:

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.  
Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта.  
Приборы и методы измерений.  
2018. – Т. 9, № 4. – С. 325–336.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

### For citation:

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V., Zhavoronkov K.G.  
[Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 1. Influence of the Geometrical Parameters].  
*Devices and Methods of Measurements.*  
2018, vol. 9, no. 4, pp. 325–336 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

## Введение

Применение поверхностных акустических волн (ПАВ) и подповерхностных объемных волн (ПВ) перспективно как для обнаружения несплошностей в поверхностной и подповерхностной зоне различного рода объектов, так и для определения их физико-механических параметров, включая твердость  $B$ , механическое напряжение  $\sigma$ , прочность на разрыв  $\sigma_{пр}$ , бальность зерна  $l_b$ , глубину упрочненного слоя  $h$ , поврежденность металла, наличие отбела в чугуне и др. [1–4]. При этом достаточно часто в качестве наиболее информативного параметра, коррелирующего с указанными свойствами, используется преимущественно скорость той или иной моды либо опосредованные и зависящие от нее параметры или зависимости. Они включают: критические углы падения волны на границу раздела сред; частотные зависимости скорости или амплитуды волны и др. Т.е.  $F_i = \{B, \sigma, \sigma_{пр}, l_b, h\} = F_i(C_{L,T,S})$ , где индексы  $L$  и  $T$  соответствуют первому и второму критическим углам падения продольной волны на объект, определяющим возбуждение в объекте продольных (головных) и поперечных ПВ соответственно, а  $S$  – ПАВ. Для эффективного же возбуждения ПАВ и ПВ выбирается угол падения акустического пучка на объект  $\beta_{L,T,S}$ , определяемый из формулы Снеллиуса:  $\sin(\beta_{L,T,S}) = C_0/C_{L,T,S}$ . Причем первые две моды относятся к классу неоднородных волн. Акустические поля их источников имеют сложную структуру, характеризуемую наличием поверхностной быстро затухающей с расстоянием волны по закону  $A \sim x^{-n}$ , где  $n \approx 1,7-1,8$  для продольной и  $n \approx 2,1-2,2$  – поперечной моды. Так что большая часть энергии акустического поля излучаемых волн дифрагирует и сконцентрирована в объеме объекта, убывая с расстоянием в дальней зоне с показателем степени  $n = 1$  [1, 4]. При этом поток дифрагирующей волны может оказать существенное влияние на измерительный процесс в результате попадания на приемный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) с некоторой временной задержкой  $\Delta t$  в результате рассеяния на граничных поверхностях.

Пример распространения подповерхностных волн в пластине или верхнем (защитном) слое объекта приведен на рисунке 1, где показаны направления распространения акустических лучей рассеянного границей акустического поля. Необходимо учесть, что область локализации энергии

дифрагирующих ПВ расширяется с увеличением расстояния от источника колебаний. При этом смещается вниз и максимум плотности энергии ПВ, локализованный в окрестности луча, идущего от источника волн под углом  $\alpha_m$ , и расположенный на расстоянии от поверхности  $z \approx x \operatorname{ctg} \alpha_m$  [4].

В отличие от неоднородных мод, поток энергии ПАВ локализован в окрестности контактной поверхности преимущественно на глубину  $h \approx \lambda_s$  и является слабо расходящимся в горизонтальной плоскости, что существенно расширяет номенклатуру контролируемых на структуру и дефектность материалов в поверхностных и подповерхностных слоях. Тем не менее даже в этом случае возможно появление сопутствующих объемных мод, которые могут оказать значимое влияние на достоверность измерений. В то же время такие объекты имеют ограниченные размеры, а поле импульсного источника волн  $\Phi(\alpha, \gamma, r)$  в объеме может существенно отличаться от поля в бесконечном пространстве, где  $\gamma$  – угол, отсчитываемый в горизонтальной плоскости  $z = 0$ , а  $\alpha$  – в вертикальной. При этом одним из важнейших факторов, ограничивающих точность измерений, является создаваемый в материале объекта акустический шум. Последний, как упоминалось выше, вызван рассеянием оппозитной границей сред дифрагирующих волн, попадающих во «временное окно» измерительного электронного тракта  $t_2 \geq t^* \geq t_1$ , где (рисунк 1)  $t_1$  – время начала отсчета появления информативного импульса, а  $t_2$  – время его завершения. Причем  $\Delta t = t_2 - t_1 = m_0 v^{-1} = m_0 T_0$ , где  $m_0$  – количество колебаний в импульсе, а  $v$  – их рабочая частота. Искажение информативного импульса может быть вызвано и генерируемыми при излучении преобразователем сопутствующими модами.

Если же исследуемый материал расположен непосредственно под защитным покрытием, то задача измерений скорости ультразвуковых колебаний (УЗК), а также выявления дефектов существенно усложняется. В особенности это относится к ситуации, когда поверхностный слой обладает неравномерной толщиной либо в нем проявляется резонанс. Указанные выше акустические процессы и являются предметом настоящих исследований. Целью работы являлось установление условий и выдача рекомендаций, обеспечивающих надежное возбуждение и измерение скорости и амплитуды поверхностных и подповерхностных волн как в защитных

покрытиях, так и в основе объекта при одностороннем доступе к его контактной поверхности.

### Распространение подповерхностных волн в однородном материале с ограниченными размерами

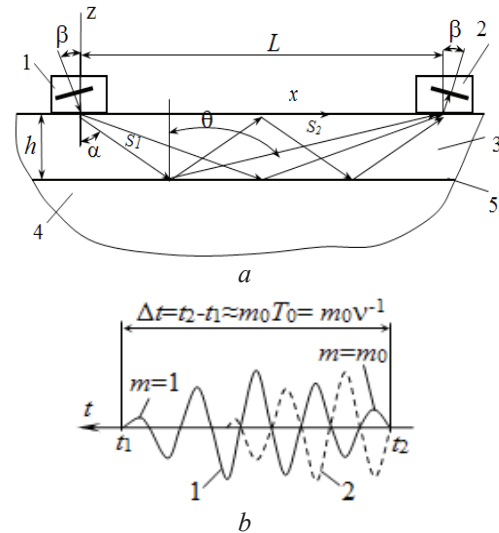
В данном разделе рассмотрены особенности распространения упругих мод при проведении акустических измерений в объекте, имеющем форму пластины либо цилиндра.

Как правило, при использовании импульсных методов измерения скорости или амплитуды волны выбирают характерную зону импульсного сигнала, на которую отсутствует воздействие паразитных сигналов акустической и/или электрической природы, например пролаза. На рисунках 1 и 2 поясняются особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в телах с ограниченными размерами, где их донная поверхность является отражателем УЗК, а рассеянные либо сопутствующие моды, распространяющиеся вдоль свободной поверхности, накладываются на информативный импульс с номером осцилляции  $m$ , что не позволяет обеспечить необходимую точность измерений.

На основе представлений лучевой акустики проанализируем акустический тракт измерительной схемы (рисунок 1). Обозначим скорость информативной моды как  $C_1 = L/(t - \Delta t_0)$ , где  $\Delta t_0$  – поправка (включая дифракционную), обусловленная особенностями измерений. Учтем, что при проведении измерений и обработке информативного сигнала необходимо устранить появление на приемном ПЭП во временном окне  $t_1 \leq t^* \leq t_1 + mv^{-1}$  сигнала как отраженных, так и распространяющихся вдоль контактной поверхности сопутствующих мод. При этом в общем виде уравнение акустического тракта для представленной на рисунке 1 схемы прозвучивания материала однократно отраженным лучом имеет вид:

$$A \sim \tilde{D}_E \tilde{D}_R F(S_1) R_f F(S_2),$$

где  $\tilde{D}_R$  и  $\tilde{D}_E$  – коэффициенты прохождения УЗК по амплитуде границы ПЭП–образец и образец–ПЭП соответственно;  $F(S_1)$  и  $F(S_2)$  – функции ослабления акустического луча при прохождении волны от излучателя до отражающей поверхности и от нее до приемного ПЭП по пути  $S_1$  и  $S_2$  соответственно;  $R_f$  – коэффициент отражения от донной поверхности.



**Рисунок 1** – Пояснение к распространению упругих волн в материале с подложкой (а) и анализу картины наложения на информативный импульсный сигнал импульса отраженной или сопутствующей моды, создающей шум при измерениях (б). а: 1 – излучающий и 2 приемный пьезоэлектрические преобразователи; 3, 4 – контактирующие материалы, 5 – их граница; б: 1 – информативный импульсный сигнал; 2 – сигнал, создающий в акустическом тракте шум

**Figure 1** – Illustration to propagation of elastic waves in layered material (a) and for analysis of the reflected or accompanying acoustical impulse creating noise when measuring (b). a: 1 is sounding probe; 2 is receiving probe; 3, 4 is contacting materials and 5 is their boundary; b: 1 is informing impulsive signal; 2 is signal creating noise when acoustical measuring

Необходимо отметить, что сопутствующими для возбуждаемой в объекте преобразователем информативной продольной волны  $L$  служат  $T$  и  $S$  моды, для  $T$  моды –  $L$  и  $S$ , для  $S$  –  $L$  и  $T$  моды. Причем отношения скоростей упругих мод в стали (к величинам которых близки многие материалы) равны:  $n_{SL} = C_S/C_L \approx 0,55$ , а  $n_{ST} = C_S/C_T \approx 0,9$ . Т.е. объемные моды имеют скорость выше, чем у ПАВ, что в ряде случаев может существенно осложнить процесс измерений и требует тщательной методической проработки акустического тракта, при котором нивелируется шум, создаваемый паразитными модами. Если в качестве информативной является  $L$ -мода или  $T$ -мода, то минимальная акустическая база, при которой отсутствует наложение сопутствующей  $C_S$  или  $C_T$  моды на  $m$ -ю осцилляцию измерительного импульса продольной волны, примет вид:

$$Lv (mC_L)^{-1} \leq C_{T,S} (C_L - C_{T,S})^{-1}.$$

Для устранения влияния наложения на осцилляции информативного сигнала с номером  $m$  и менее акустических паразитных колебаний, вызванных однократным отражением от донной поверхности части потока информативной или сопутствующей моды, необходимо выполнение условий:

$$\frac{m}{v} \geq \frac{L}{C_1} \left[ (\sqrt{x^{*2} + h^{*2}} + \sqrt{(1-x^{*2})^2 + h^{*2}}) n_{0l} - 1 \right], \quad (1)$$

где знак  $*$  характеризует обезразмеривание геометрического параметра по  $L$ ,  $n_{0l} = \frac{C_0}{C_1}$ ,  $C_1 \in \{C_T, C_L, C_R\}$ . Как легко показать из анализа формулы (1), быстрее всего на приемный ПЭП приходят волны, рассеянные локальным участком донной поверхности в окрестности  $x = L/2$ . Если для проведения корректных измерений акустических параметров среды достаточно использовать «выделенную» во времени  $t_1 + mv^{-1}$  часть импульса, то оценочное значение искомой акустической базы, определяемое из (1), примет вид:

$$L_\lambda = L/\lambda \leq \mathfrak{S} \pm (\mathfrak{S}^2 + \mathfrak{R})^{0,5}, \quad (2)$$

$$\text{где } h_\lambda = h/\lambda; \quad \mathfrak{S} = m(1 - n_{0l}^2) h_\lambda^2;$$

$$\mathfrak{R} = (m^2 - 4n_{0l}^2 h_\lambda^2)(1 - n_{0l}^2)^{-1} h_\lambda^2.$$

Если же длительность зондирующего импульса достаточно большая или скорость сопутствующей моды больше информативной, то условие, при котором сопутствующая мода, отражаясь  $k$  раз в волноводе, не попадает во временное окно (запаздывает), также определяется выражением (2), где скорректированное значение  $\mathfrak{R} = (m^2 - 4k^2 n_{0l}^2 h_\lambda^2)(1 - n_{0l}^2) h_\lambda^2$ . Это выражение упрощается, когда донной поверхностью объекта рассеивается часть потока акустической энергии основной моды. При этом реализуется указанное условие (4) в виде:  $2L_\lambda \leq 4(h_\lambda)^2 m^{-1} - m$ .

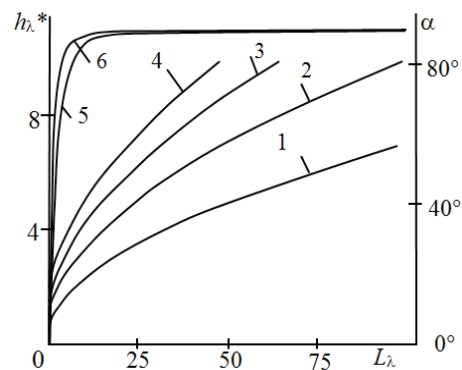
На рисунке 2 приведены рассчитанные граничные кривые, связывающие акустическую базу, толщину объекта, длину волны и номер осцилляции  $m$ , при которых сопутствующая паразитная мода не накладывается на осцилляции импульса с номерами осцилляций  $m$  и менее). Как видно, при проведении измерений с использованием продольной ПВ и уменьшении толщины пластинчатого волновода для соблюдения условий (4) следует либо уменьшать (до определенных пределов) длину акустической базы, либо увеличивать частоту волны. Отметим, что полученные выше зависимости характерны

для акустических измерений с использованием как продольных, так и поперечных ПВ.

Как указывалось выше, в волноводах ограниченной толщины при падении акустического луча под вторым критическим углом одновременно генерируется продольная мода, имеющая скорость практически в 2 раза больше, чем поперечная волна. Из указанных выше соображений следует, что при проведении измерений следует избегать таких ситуаций, когда выполняется условие  $0 \leq \Delta t \leq m/v$ . Пригодными же для измерений являются временные интервалы  $0 > \Delta t > m/v$ . Как следует из (2), условие  $\Delta t = m/v$ , при котором происходит наложение  $k$ -кратно отраженной (паразитной) продольной ПВ на  $m$ -й период осцилляции (колебаний) информативного импульса поперечной волны, выполняется, если критическая толщина волновода:

$$h_\lambda \rightarrow \frac{2}{k+1} \left[ \sum_{k=0}^{k=2} a_i (L_\lambda)^k \right]^{0,5},$$

где  $k$  – число отражений выделенного акустического луча в волноводе:  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = 1/2n_{0l}$ ,  $a_2 = 3/4n_{0l}^2$ .

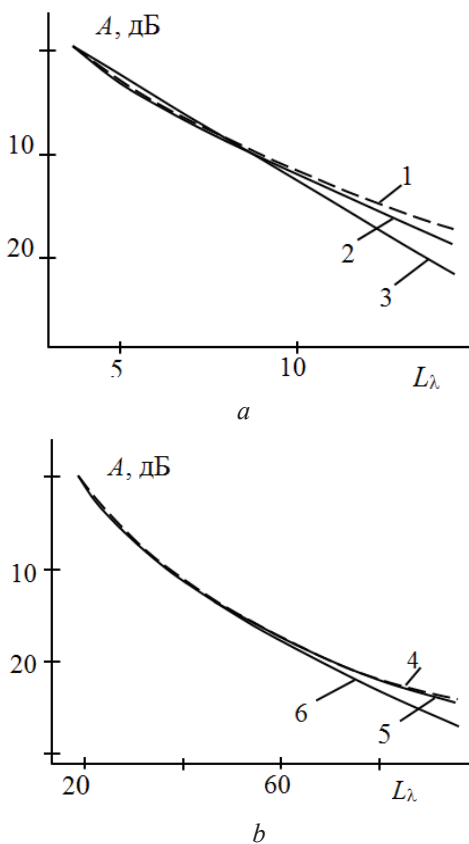


**Рисунок 2** – Расчетные зависимости граничной толщины верхнего слоя (1–4) и угла преломления на границе контакта призмы пьезоэлектрического преобразователя с объектом (5, 6) от длины акустической базы: номер осцилляции в импульсе информативного сигнала  $m = 1$  (1, 5); 2 (2); 3 (3); 4 (4, 6)

**Figure 2** – Calculation dependences of boundary thickness (1–4) and an angle of refraction of ultrasonic beam at the contact boundary prism of ultrasonic probe-object (5, 6) vs. length of acoustic base: a number of the impulse oscillations in informational signal is:  $m = 1$  (1, 5); 2 (2); 3 (3); 4 (4, 6)

Для проверки численных расчетов проведены экспериментальные исследования согласно традиционной методике, поясняемой рисунком 3

и заключающейся в анализе нормализованной амплитуды и формы сигнала при работе ПЭП в теневого режиме. При этом изменение акустической базы  $L$  производится путем перемещения одного из ПЭП вдоль оси  $x$  образцов разной толщины. Нестабильность выхода генератора электрических импульсов в процессе измерений контролируется путем сравнения с опорным сигналом генератора стандартных сигналов в пределах не более 3–5 %. При этом одновременно производилось фазовым методом измерение скорости продольной волны в материале, из которого изготовлен образец, с погрешностью не хуже 0,05 %.



**Рисунок 3** – Экспериментальные зависимости амплитуды продольной подповерхностной волны от длины акустической базы, измеренные на образцах стальных пластин на частоте 1 МГц (а) и 5 МГц (б):  $h_\lambda = \infty$  (1, 4); 1,6 (2); 1 (3); 8,5 (5); 4,7 (6)

**Figure 3** – Experimental dependences of amplitude of longitudinal subsurface wave on length of acoustic base measured on the specimens of the steel plates when ultrasonic frequency is of 1 MHz (a) and 5 MHz (b):  $h_\lambda = \infty$  (1, 4); 1,6 (2); 1 (3); 8,5 (5); 4,7 (6)

Данные исследований поясняются на рисунке 4, где приведены экспериментальные

зависимости нормализованной амплитуды зондирующей волны ПВ от безразмерной акустической базы  $L_\lambda$ , измеренные на образцах стальных пластин разной толщины. Как видно, зависимости  $A(L_\lambda)$  монотонно убывающие, совпадающие с аналогичной зависимостью, полученной для случая моделирования образца с безразмерной толщиной  $h_\lambda \gg 1$ . При превышении величины  $L_\lambda \rightarrow L_\lambda^*$  происходит «расщепление» этих кривых, что сопровождается не только изменением формы импульса, но и отклонением измеряемой скорости от реальной более чем на  $\approx 0,1$ – $0,2$  %. Именно при  $L_\lambda < L_\lambda^*$  (а также при допустимых значениях  $h_\lambda$ ) следует ожидать реализации такого режима теневого прозвучивания, при котором можно пренебречь влиянием переотраженных сигналов на информативный импульс, используемый для определения скорости или амплитуды волны. С другой стороны, с увеличением толщины пластины возрастает величина допустимой акустической базы  $L_\lambda^*$ , что в большинстве случаев позволяет обеспечить большую точность измерения скорости волны.

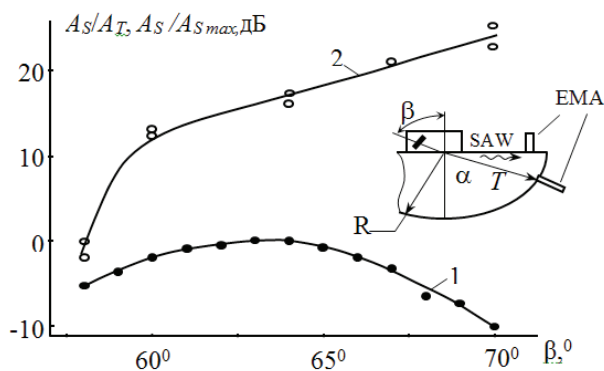
В результате сравнения результатов экспериментальных исследований и численных расчетов установлено качественное соответствие хода их зависимостей  $L_\lambda^*(h_\lambda)$ . Отметим, что при экспериментальном моделировании распространения продольной ПВ в пластинчатых образцах стали Ст40 толщиной 5 мм на частоте 1,8 МГц измеренная импульсно-фазовым методом фазовая скорость (с использованием для индикации времени распространения сигнала на заданной акустической базе осцилляций с номером  $m = 1$  и 2) практически не отличалась в пределах  $\pm 0,07$  % от полученной на образце толщиной 50 мм, моделирующем полубесконечное тело. При этом толщина пластины достигала величины  $h_\lambda < 2$ . Отметим, что оцененные опытные значения граничных величин  $L_\lambda^*$ , характеризующих наложение паразитного сигнала на информативный сигнал, несколько превышают расчетные данные, полученные с использованием представлений лучевой акустики. При этом, согласно опытным данным, безразмерной толщине образца  $h_\lambda = 4,7$  соответствует акустическая база прозвучивания металла  $L_\lambda^* \approx 50$ . Данные же расчетов величины  $L_\lambda^*$  меньше – всего на 14 %. В то же время при  $h_\lambda < 2$  это отличие для  $L_\lambda^*$  может составить  $\approx 50$  %. По-видимому, столь существенное различие расчетных и опытных данных наблюдается именно из-за «перекачки» вводимой энергии

в пластинчатые моды, имеющие меньшую скорость, чем продольная ПВ. При этом наблюдается значимое ослабление амплитуды информативной моды.

## Особенности измерения акустических параметров поверхностных волн на плоской и цилиндрической поверхностях

### Поверхностных волн на плоской поверхности

Если информативной является поверхностная мода, то, как указывалось выше и следует из опытных данных, при выборе оптимальной схемы прозвучивания необходимо избавиться от шума паразитного сигнала, создаваемого преимущественно сопутствующей поперечной модой, распространяющейся вдоль поверхности. Влиянием же отраженных от донной поверхности дифрагирующих поперечных волн, как правило, можно пренебречь.



**Рисунок 4** – Влияние угла призмы пьезоэлектрического преобразователя на амплитуду возбуждаемой поверхностной и поперечной (сопутствующей) подповерхностной волны и схема проведения исследований поля излучения акустических волн магнитоакустическим методом (ЭМА): 1 –  $A_s/A_{s0}$ ; 2 –  $A_s/A_T$ ; SAW – поверхностные акустические волны

**Figure 4** – Influence of the angle of an ultrasonic probe's prism on amplitude of excited surface  $A_s$  and subsurface transverse (accompanying)  $A_T$  waves and experimental scheme of the study of the field of radiated acoustical waves by a magnetoacoustic method (EMA): 1 is  $A_s/A_{s0}$ ; 2 is  $A_s/A_T$ ; SAW is surface acoustical waves

Как указывалось выше, отраженные от донной поверхности сопутствующие объемные волны, имеющие скорость, превышающую  $C_s$ , а также распространяющаяся вдоль поверхности поперечная ПВ являются паразитными. Для уменьшения их влияния на информативный сигнал предложено не только изменять (по возмож-

ности) акустическую базу прозвучивания, частоту волны, но и, что весьма существенно, увеличить угол призмы преобразователя ПАВ. Как видно из полученных и поясняемых на рисунке 5 экспериментальных зависимостей, превышение угла падения волны  $\beta_s$  над оптимальным значением всего на  $6^\circ$  сопровождается снижением амплитуды ПАВ на 9–10 дБ. Однако при этом соотношение сигнал–шум (по отношению к поперечной сопутствующей моде) превышает 20 дБ. Что же касается продольной сопутствующей моды, то ее влиянием, как правило, можно пренебречь.

### Поверхностная волна на цилиндрической поверхности

Исследование акустических параметров тел цилиндрической формы поверхностной волной может производиться путем прозвучивания вдоль их образующей. Причем в этом случае, как правило, легче избавиться от шума, создаваемого сопутствующими и отраженными объемными модами, имеющими место в рассмотренной выше ситуации. Следует отметить, что при исследовании объектов низкочастотными модами либо объектов с достаточно малым радиусом кривизны необходимо учитывать влияние на информативный сигнал двух, (зеркально) обтекающих в разные стороны цилиндрическую поверхность по винтовой траектории поверхностных мод. Условие наложения на осцилляцию информативного импульсного сигнала (распространяющегося вдоль образующей цилиндра) с номером  $m$  обтекающих мод имеет вид:

$$L_0 = \frac{b}{2a} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4ac}{b^2}} \right), \quad (3)$$

где  $a = 2\delta C_{s0}^{-2}$ ;  $b = 2mv^{-1}C_{s0}^{-1}$ ;  $c = 4\pi^2 m^2 v^{-2} \cdot (R/C_{s0})^{-2} (1 - 2\delta)$ ;  $\delta = \Delta C_s C_{s0}^{-1}$ ;  $\Delta C_s = C_s(\phi) - C_{s0}$ ;  $C_{s0} = C_s$  при  $\phi = 0$ ;  $\phi = \pm \arccos(\mathbf{k}_0 \mathbf{k}_\theta) = \pm \arctg(2\pi R/L)$  – угол наклона волновых векторов  $\mathbf{k}_\theta$  выделенных акустических лучей поверхностных мод, движущихся по винтовой траектории относительно направления оси волновода и приходящих во «временное окно». Причем  $\delta = \delta(\phi)$  является анизотропной функцией согласно [5].

Если пренебречь анизотропией скорости ПАВ, составляющей несколько процентов, то из (3) следует, что  $L_0 = \frac{n}{b}$ . Как показывают экспериментальные исследования, наложение вращающей моды на зондирующий импульс

при плавном осевом перемещении одного из ПЭП сопровождается характерной интерференционной картиной, обусловленной суперпозицией информативной и вращающихся мод. Т.е. результирующий сигнал в области их встречи примет вид:

$$\tilde{A} = A_0 \exp(-ik_0 x) + A_1 \exp(-ik_1 l_1) + A_2 \exp(-ik_2 l_2),$$

где  $A_0$  и  $k_0$  соответствует амплитуде и волновому числу информативной волны, распространяющейся вдоль оси  $x$  цилиндра, а  $\{A_1, k_1\}$  и  $\{A_2, k_2\}$  – вращающимся модам;  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния, пройденные вращающимися модами до встречи, причем отношения волновых чисел, амплитуд и расстояний, пройденных вращающимися модами –  $k_1/k_2 = l_1/l_2 = A_1/A_2 = 1$ .

Путем изменения акустической базы, частоты волны, длительности импульса, представляется возможным отстроиться (во времени) от наложения вращающихся мод на информативный сигнал ПАВ, распространяющейся вдоль образующей цилиндрического объекта. С другой стороны, направленно варьируя указанные параметры и измеряя в теновом режиме характерный период между экстремумами  $T_m$  суммарного взаимодействия информативной и вращающихся мод, представляется возможным изучать свойства поверхностных слоев твердых тел и их анизотропные характеристики.

### Возбуждение и распространение подповерхностных и поверхностных волн в объекте с покрытием

*Подповерхностные волны под защитным клиновидным слоем*

Задача контроля физико-механических свойств по данным скорости звука существенно осложняется, когда требуется определить скорость  $C_{L2}$  в основе материала объекта с высокой точностью, если на нем имеется защитное покрытие с однородными свойствами, но изменяющейся по линейному закону толщиной. Предполагается, что толщина покрытия лежит в пределах  $h = h_1 - h_2$ , причем  $C_{2L}(C_{1L})^{-1} > 1$ .

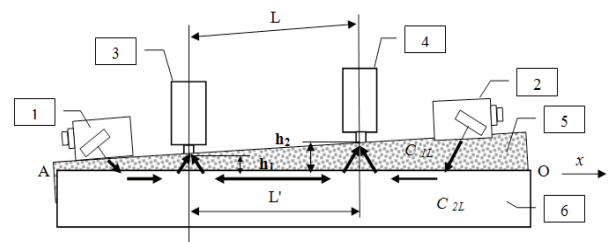
Для решения этой задачи предлагается схема прозвучивания, поясняемая рисунком 5.

Излучение ПВ производится наклонными ПЭП, а в качестве приемных ПЭП используются малоапертурные преобразователи, обеспечивающие высокую локальность (до 0,3 мм) и стабильность акустического контакта, необходимые для высокоточных измерений скорости упругих волн.

Согласно предложенной методике озвучивание объекта производится головными волнами дважды – в противоположных направлениях.

Пусть при проведении измерений ПЭП 1 и ПЭП 2 попеременно излучают ПВ в контролируемый объект 6, а преобразователи 3 и 4 попеременно принимают акустические сигналы. Для этих случаев определяем время распространения сигнала между ПЭП:  $\Delta\tau_{21}$  – слева направо,  $\Delta\tau_{12}$  – справа налево. Необходимо отметить, что при распространении продольной ПВ вдоль поверхности раздела сред и непосредственно в материале покрытия переизлучаются «вытекающие» продольные и поперечные моды соответственно под первым и вторым критическим углом, что необходимо учитывать при оптимизации режима прозвучивания. Базовое уравнение, связывающее скорость ПВ, акустическую базу прозвучивания (между приемными малоапертурными преобразователями), имеет вид:

$$2(\tau_2 - \tau_1)^2 [L^2 + C_{2L}^2 (\tau_1 + \tau_2)^2]^{-1} + (C_{2L} \sin \beta)^{-1} - (C_{1L} \cos \beta)^{-1} = 0.$$



**Рисунок 5** – Схема определения скорости подповерхностной продольной волны под защитным покрытием: 1, 2 – излучающие, 3, 4 – приемные (ненаправленные или малоапертурные) пьезоэлектрические преобразователи; 5 – защитный слой; 6 – основа объекта;  $C_{1L}$  и  $C_{2L}$  – скорости продольных волн в покрытии и основе объекта

**Figure 5** – Scheme of the subsurface longitudinal wave velocity  $C_{2L}$  study under protective layer: 1, 2 are sounding probes; 3, 4 are receiving (non-directional) probes; 5 is a protective layer; 6 is the object to test;  $C_{1L}$  is ultrasonic velocity in protective layer and  $C_{2L}$  is in the material base of the object

Разлагая в ряд Тэйлора искомое решение для  $C_{2L}$ , с достаточной для практики точностью (до 8-го порядка малости) получим:

$$C_{2L} = C_{20} \{1 - 2^{-1} n_0 (\Delta\tau_0)^2 + 2^{-4} n_0^2 (\Delta\tau_0)^4 - 2^{-2} n_0^4 (\Delta\tau_0)^8\},$$

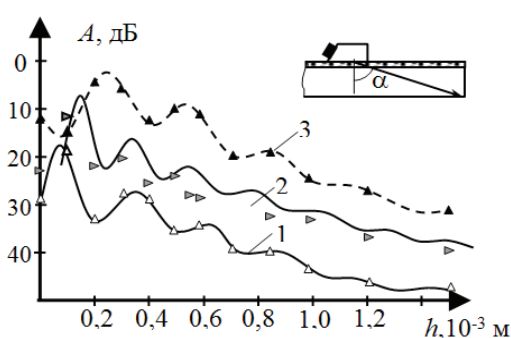
где  $C_{20} = 2L(\tau_1 + \tau_2)^{-1}$ ;  $\Delta\tau_0 = (\tau_1 - \tau_2)(\tau_1 + \tau_2)^{-1}$ ;  $n_0 = C_{1L}/C_{20}$ .



Если же скорость в контактирующих материалах известна, то разнотолщинность клиновидного слоя можно оценить по формуле:  $\Delta h = [L^2 - C_{2L}^2(\tau_1 + \tau_2)^2]^{0.5}$ . Таким образом, проведенный выше анализ предложенных схем измерения и полученные оценочные формулы указывают на возможность измерения скорости продольной ПВ в материале, покрытом защитным слоем, обеспечив высокую точность. Т.е. в ряде случаев указанным методом представляется возможным производить оценку структуры основы объекта, напряженное состояние в нем и др.

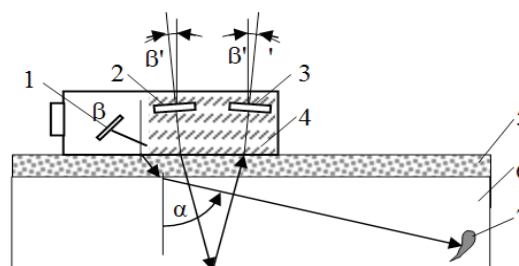
#### Проявление интерференционного эффекта в защитном плоском слое

Обратим внимание на тот факт, что при  $h_1 \sim \lambda$  следует ожидать эффекта интерференции переотраженных в слое упругих мод, падающих на исследуемую границу под критическими углами, что иллюстрируется рисунком 6. Для проверки этого применительно к контролю объектов с покрытием были проведены экспериментальные исследования согласно опытной схеме, представленной на рисунке 7. Для этих целей были изготовлены стальные образцы размерами  $40 \times 120 \times 20$  мм с нанесенным на них эмалевым покрытием различной толщины ( $h = 0-2$  мм) и шагом  $\approx 0,1$  мм. В качестве отражателя использован прямой двугранный угол стального образца (основы). Были исследованы зависимости амплитуды эхо-сигнала  $A$  от толщины эмалевого покрытия  $h$  в частотном диапазоне  $\nu = 1,8-5$  МГц и угла ввода в металл:  $\alpha = 0^\circ; 40^\circ; 50^\circ; 65^\circ$ . Некоторые результаты исследования приведены на рисунке 6.



**Рисунок 6** – Влияние толщины покрытия на амплитуду отраженной в объеме материала от дефекта объемной волны: угол ввода  $\alpha = 75^\circ$  (3);  $50^\circ$  (2);  $0^\circ$  (1); 1, 2 – поперечная, 3 – продольная моды

**Figure 6** – Dependence of the protective layer thickness vs. amplitude of reflected signal from defect: angle of input  $\alpha = 75^\circ$  (3);  $50^\circ$  (2);  $0^\circ$  (1); 1, 2 is transverse and 3 is longitudinal mode



**Figure 7** – Предложенная схема преобразователя с дополнительным акустическим каналом для устранения эффекта интерференции в защитном слое на проведение измерений: 1–3 – пьезопластины; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – защитное покрытие; 6 – основной металл; 7 – отражатель-дефект

**Figure 7** – Suggested scheme of ultrasonic probe with an additional acoustic channel for the removal of the interference effect in protective layer: 1–3 are piezoelectric plates; 4 is ultrasonic probe; 5 is protective layer; 6 is metallic base; 7 is artificial defect

Прежде всего, следует отметить, что результаты выполненного выше анализа акустического тракта ультразвукового дефектоскопа находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Так, на всех частотах и углах ввода в металл, включая угол  $\alpha = \pi/2$  (соответствующий вводу головных волн), проявляется эффект интерференции. В этих условиях функция  $A(h)$  имеет осциллирующий вид, размах колебаний амплитуды которой может достигать  $\sim 10$  дБ, что зависит от частоты волны и угла ввода  $\alpha$ . С увеличением  $h$  ход зависимости функции  $A(h)$  «сглаживается» из-за ухудшения условий проявления интерференции в результате ослабления сигнала в покрытии, его ограниченности по времени и выходом переотражаемых в покрытии сигналов из эффективной для резонанса угловой зоны ввода-приема колебаний. По указанной причине при  $h_\lambda > (2-3)$  эффекты интерференции практически не проявляются, если количество осцилляций в импульсе не более 5–6, что характерно для ультразвукового контроля серийными дефектоскопами.

Таким образом, при определенных условиях для повышения достоверности измерений при движении ПЭП необходимо учитывать возможное изменение  $h$ , влияющее на амплитуду измеряемого сигнала. Для этого предлагается метод, заключающийся в создании дополнительного акустического канала и получении опорного сигнала, реагирующего одновременно на проявление резонанса в измерительном тракте на рабочей частоте  $\nu$ . При этом дополнительно

используется отраженный от донной поверхности нормально падающий на нее импульс продольной волны. Если скорость продольной моды в защитном слое  $C_L$ , а поперечной  $C_T$ , то частоту опорного сигнала  $\nu^*$  выбирают из условия одинакового фазового сдвига при прохождении защитного слоя сигналом опорной волны и информативным сигналом поперечной или продольной моды ( $C_{L,T}$ ):

$$\nu^*/\nu = C_L (C_{L,T})^{-1} (\cos\alpha)^{-1}.$$

Отметим, что наличие дополнительного измерительного канала позволяет повысить надежность измерительного тракта и за счет слежения за качеством акустического контакта. Если же проводятся измерения скорости УЗК, то, возможно, придется учитывать и различие фазовых сдвигов в обоих каналах, вызванных разными условиями переотражения мод в защитном слое.

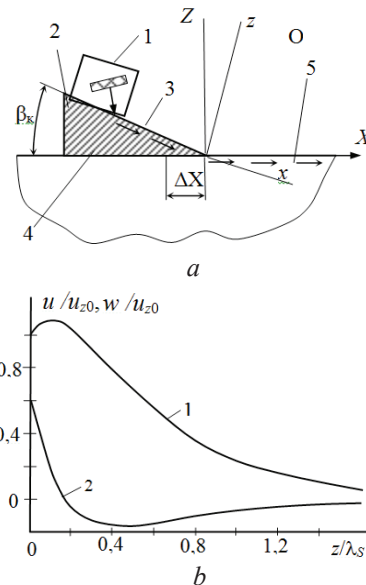
### О возбуждении поверхностных волн в материалах с разной скоростью с использованием клиновидного звукопровода

Необходимо отметить, что проведение высокоточных измерений поверхностными волнами свойств твердых тел с разной (и неизвестной) скоростью  $C_S$  существенно затруднено ввиду значимого влияния условий ввода-приема на амплитудные и спектральные характеристики измерительного импульса. При этом получаемая информация о структуре материала и его дефектности недостаточно надежна. Использование же для этой цели набора преобразователей с различным углом призмы ПЭП (либо изменяющимся углом) весьма затруднительно. (Так, например, при структуроскопии чугунов с помощью импульсно-фазового метода их скорость может изменяться до 30–40 %.)

Предложенная и апробированная для этих целей схема методики измерений и реализующая ее конструкция устройства (рисунок 8) основана на результатах проведенных нами ранее исследований по трансформации и рассеянию волн Рэлея и Стоунли на акустической скользящей нагрузке [6]. При этом было показано, что в некотором угловом диапазоне варьирования  $\beta_k$  обнаружена возрастающая зависимость амплитуды возбуждаемой и принимаемой ПАВ.

Суть предложенного заключается в том, что между исследуемым объектом и преобразователем поверхностных волн ПЭП помещается со-

гласующий звукопроводный слой в виде клина с оптимально выбранным углом  $\beta_k$ , при котором наблюдается максимальный коэффициент двойного прохождения поверхностной волны  $K_S^0 = D_e D_r$ , где  $D_e$  и  $D_r$  – коэффициенты прохождения ПАВ в прямом и обратном направлении локальной области границы контакта, лежащей в окрестности  $z = x = Z = X = 0$ .



**Рисунок 8** – Предложенная схема устройства для возбуждения (приема) поверхностных волн в материалах с разной скоростью (а) и пояснение к характеру распределения нормальной  $u$  (1) и тангенциальной  $w$  (2) составляющей смещений в поверхностном слое стали (b): 1 – преобразователь поверхностных акустических волн; 2 – акустически согласующая призма; 3 – внешняя контактная поверхность; 4 – рабочая поверхность; 5 – контролируемый объект

**Figure 8** – Suggested scheme of ultrasonic arrangement for excitation (receiving) surface waves in materials with different ultrasonic velocity (a) and distribution of normal  $u$  (1) and tangential  $w$  (2) of constituent of displacements in a steel subsurface layer (b): 1 is ultrasonic probe of the surface waves; 2 is acoustically adopted prism of the wedged-shaped form; 3 is external contact surface; 4 is working surface; 5 is object to control

Анализ распределения поля смещений в поверхностном слое твердых тел (рисунок 8b), а также предварительные экспериментальные исследования показали существование оптимальных условий передачи-приема ПАВ, при которых коэффициент двойного прохождения ПАВ  $K_S^* = K_S^*(\beta_k, \nu)$  максимален и четко выражен. Экспериментально установлено, что введение дополнительного клиновидного звукопровода снижает величину  $K_S^*$  не более, чем на 13–14 дБ,

по сравнению со стандартным случаем, когда идет непосредственная (без клина) передача ПАВ в объект указанным на рисунке 8 наклонным преобразователем – с призмой из полимера.

Отметим, что прохождение ПАВ через поверхность, контактирующую с другим объектом, сопровождается трансформацией и отражением волн, что зависит от граничных условий закрепления смещений в волне [7, 8], которая в данном случае скользящая и реализуется через смазку. Физическая же сущность предложенного механизма передачи-приема ПАВ в материалах с разной скоростью ПАВ заключается в том, что преобладающая часть энергии, проходящей по поверхности клина волны, заключена в слое толщиной  $\approx \lambda_c/2$ , и по мере распространения по поверхности клина 3 волны эффективность ее передачи в объект будет наблюдаться в области  $\Delta x < \lambda_c(2\sin\beta_c)^{-1}$ . При этом преобладающей энергией обладает нормальная к поверхности 3 составляющая смещений  $u_z$ , образующая с осью  $X$  угол  $\beta_c$ . При этом для  $\beta_c < \pi/6$   $u_z = u \cos\beta_c \approx u[1-0,5(\beta_c)^2]$ , а энергия волны в локальном объеме звукопровода для этой составляющей  $\sim u^2[1-(\beta_c)^2]$ .

Путем оптимизации конструкции и выбора  $\beta_c$  достигаются условия, при которых область локализации источника волн на границе клина с основой (в окрестности вершины клина)  $\Delta x < \lambda$ . При этом работа предложенного устройства подобна работе малоапертурного ПЭП, преобразующего продольные колебания в ПАВ [9]. Однако в силу ряда особенностей трансформации мод эффективность двойного преобразования предложенной схемы возбуждения ПАВ более чем на порядок лучше. Шумовой же фон – значительно ниже, что позволяет прозвучивать изделия как в теновом, так и эхо-режимах.

## Заключение

На основе представлений лучевой акустики проведен теоретический анализ и получены оценочные соотношения между геометрическими параметрами объектов с плоской и цилиндрической поверхностью, акустической базой принимающих акустический сигнал преобразователей, длиной волны подповерхностной и поверхностной моды, количеством осцилляций в импульсе, при которых обеспечиваются оптимальные условия для нивелирования акустического шума в акустическом тракте при измерении скорости

ультразвука. Проведено сопоставление данных экспериментальных исследований с расчетными согласно используемой упрощенной теоретической модели.

Определены условия, устраняющие влияние вращающихся мод на измерительный процесс при прозвучивании цилиндрического объекта поверхностной волной вдоль его оси, а также предложено использовать условия интерференции прямой и вращающихся мод для контроля поверхностной структуры таких материалов по данным сравнения скорости волн, движущихся под разными углами к образующей поверхности.

Изучена возможность и экспериментально апробирована предложенная схема возбуждения-приема поверхностных волн в материалах с разной скоростью, изменяющейся на 30–35 % и более, что достигается путем введения дополнительного акустически согласующего звукопроводного элемента в виде клина между наклонным преобразователем поверхностной волны и исследуемым объектом.

В результате анализа акустического тракта определены условия применения и получены выражения для определения скорости подповерхностной продольной волны в основе материала, расположенной под защитным покрытием в виде клина согласно предложенной компенсационной схеме измерений. Предложен способ уменьшения влияния интерференционных явлений на контроль качества материала и выявление в нем дефектов под защитным покрытием путем использования дополнительного акустического канала, параметры которого определяются углом призмы, рабочей частотой преобразователя и скоростью волн в контактирующих средах.

## Список использованных источников

1. Razygraev, A.N. Ultrasonic Testing of Austenite Welded Joints in IY-300 Pipelines / A.N. Razygraev, N.P. Razygraev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2006. – Vol. 42, no. 10. – P. 682–691. DOI: 10.1134/S106183090610007X
2. Kim, H.J. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves / Song S.-J. Golden, D.Y. Kim, S.D. Kwon, H.J. Kim // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Colorado, 2007. – Vol. 27B. – P. 1066–1073. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2902550>
3. Kruger, S.E. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound / M. Lord, D. Levesque, S.E. Kruger, A.J. Bakker // Review of

Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden. – Colorado, 2007. – Vol. 27A. – P. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2902670>

4. Baev, A.R. Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: II. Effects of Some Boundary Conditions on Formation of Acoustic Fields / A.R. Baev, M.V. Asadchaya // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – Vol. 41, no. 9. – P. 577–585. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11181-006-0004-9>

5. Pecorary, C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // J. Acoust. Soc. Amer. – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1570437>

6. Баев, А.Р. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница контакта / А.Р. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 28–39. DOI: [10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39](https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39)

7. Jerzak, W.I. Modeling Rayleigh and Stoneley waves and other interface and boundary effects with the parabolic equation / W.I. Jerzak, W.L. Siegmann, M.D. Collins // J. Acoust Soc Am. – 2005 Jun. – Vol. 117(6). – P. 497–34503. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1893245>

8. Abbakumov, K.E. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact / K.E. Abbakumov, V.A. Konovalov // Abstracts of 10<sup>th</sup> European conference on Nondestructive testing. – Moscow, 2010. – P. 173–175.

9. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А.М. Люткевич, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

10. Abbakumov, K.E. Influence of a loss in the Acoustic contact on the Propagation of Stoneley waves near the Boundary Between Solid Half-Spaces / K.E. Abbakumov, R.S. Konovalov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Vol. 44, no. 3. – P. 196–201. DOI: [10.1134/S1061830908030054](https://doi.org/10.1134/S1061830908030054)

## References

1. Razygraev, N.P., Razygraev, A.N. Ultrasonic testing of austenite welded joints in y-300 pipelines. *Russian*

*Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 682–691. DOI: [10.1134/s106183090610007x](https://doi.org/10.1134/s106183090610007x).

2. Golden Song S.-J., Kim D.Y., Kwon S.D., Kim H.J. Evaluation of thin coating layers using Rayleighlike waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Colorado, 2007, vol. 27B, pp. 1066–1073.

3. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Golden, Colorado, 2007, vol. 27A, pp. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2902670>

4. Baev A.R., Asadchaya M.V. Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: II. Effects of Some Boundary Conditions on Formation of Acoustic Fields. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, no. 9, pp. 577–585. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11181-006-0004-9>

5. Pecorary C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1570437>

6. Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I., Lark K.G., Gill N.N. [Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding]. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian). DOI: [10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39](https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39)

7. Jerzak W.I., Siegmann W.L., Collins M.D. Modeling Rayleigh and Stoneley waves and other interface and boundary effects with the parabolic equation. *J. Acoust Soc Am*, 2005 Jun., vol. 117(6), pp. 497–34503. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1893245>

8. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact. *Abstracts of 10th European conference on Nondestructive testing*, Moscow, 2010, pp. 173–175.

9. Ljutkevich A.M., Zhukov A.V., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. [Acoustical fields of the probes with small aperture. Transverse waves, radiated by rectangular source of the normal force]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

10. Abbakumov K.E., Konovalov R.S. Influence of a Loss in the Acoustic Contact on the Propagation of Stoneley Waves near the Boundary between Solid Half-Spaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 196–201. DOI: [10.1134/S1061830908030054](https://doi.org/10.1134/S1061830908030054)