

2. **Исаев А. Е.** Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево: Изд-во ВНИИФТРИ, 2008.

3. **ГОСТ 8.207—76.** ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

4. **ГОСТ 8.381—2009.** ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

5. **РМГ 43—2001.** ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерения».

6. **Еняков А. М. и др.** Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот 250 Гц — 200 кГц// Измерительная техника. 2011. № 11. С. 66—69.

7. **Wang Yuebing e. a.** Report on the COOMET pilot Comparison 473/RU/09: Calibration of hydrophones in the frequency range from 250 Hz TO 200 kHz//CCAUV/08-10.2010.

8. **ГОСТ Р 8.727—2010.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений звукового давления в водной среде в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^6$ Гц.

Дата принятия 08.04.2013 г.

534.221:53.089.68:620.179.16

Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твердых средах

П. В. БАЗЫЛЕВ, А. В. ИЗOTOV, А. И. КОНДРАТЬЕВ, В. А. ЛУГОВОЙ, К. Н. ОКИШЕВ

Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Хабаровск, Россия, e-mail: bazylev@dfvniiftri.ru, lugovoy@dst.khv.ru

Рассмотрены результаты совершенствования национального эталона единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах. Описаны методы измерений и эталонные меры скорости. Приведены состав нового эталона и его метрологические характеристики.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, ультразвуковые волны, лазерно-интерференционный метод, воспроизведение и передача единицы.

The results of improvement of national standard of longitudinal ultrasonic waves velocity in solids are considered. The measurement methods and the velocity standard measures are described. The metrological characteristics and the standard composition are given.

Key words: national primary standard, ultrasonic waves, laser interference method, unit reproduction and transfer.

В соответствии с научно-технической программой «Эталон России» и планом мероприятий по внедрению государственного первичного эталона единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах ГЭТ 189—2010 [1] в Дальневосточном филиале ВНИИФТРИ в период 2010—2012 гг. проведены работы по совершенствованию эталона, заключающиеся в разработке и введению в его состав двух новых эталонных установок для измерений скоростей распространения сдвиговых и поверхностных ультразвуковых (УЗ) волн в твердых средах. Таким образом, новый государственный первичный эталон (ГПЭ) ГЭТ 189—2012 обеспечивает единство измерений скоростей распространения основных типов акустических волн в твердых средах. Эталон возглавляет государственную поверочную схему для средств измерений (СИ) скорости распространения УЗ-волн в твердых средах, устанавливающую порядок передачи воспроизводимых единиц рабочим эталонам и СИ.

Потребность в измерениях параметров распространения УЗ-волн в твердых средах определяется задачами как фундаментальных, так и прикладных исследований. В фундаментальных исследованиях через параметры распространения УЗ-волн в твердых средах рассчитываются упругие постоянные и модули упругости — важнейшие характеристики твердого тела [2]. Эти параметры требуются также для определения физико-механических характеристик, прочностных свойств твердых сред и имеют важнейшее значение при создании новых материалов, отработке технологий их получения и внедрении в технические разработки и производство. Однако, прежде всего, потребность в измерениях скорости распространения УЗ-волн связана с необходимостью обеспечения единства измерений в области неразрушающего контроля качества материалов и изделий с использованием акустических методов и СИ.

Анализ отечественной и зарубежной литературы в данной области измерений показывает, что наиболее перспек-

тивным направлением разработки исходных эталонных СИ в акустике твердых сред является применение бесконтактных методов генерации и приема УЗ-волн: оптического и емкостного [3—8]. Оптические методы легли в основу создания ГЭТ 189—2012.

Эталонная лазерно-интерференционная установка для измерения скорости распространения продольных УЗ-волн, входящая в состав ГЭТ 189—2010 [1], была использована в качестве базовой при создании объединенной эталонной установки для воспроизведения единиц скорости распространения продольных и сдвиговых УЗ-волн, что позволило в одной установке совместить два прецизионных СИ. Дело в том, что при лазерной генерации УЗ-волн в твердом теле возбуждаются не только продольные волны, но и акустические волны других типов, в том числе сдвиговые и поверхностные [5, 6, 8]. При совершенствовании эталона также использовались результаты работ по созданию и эксплуатации установки высшей точности УВТ 79-А-92 [9]. Рассмотрим основные особенности нового первичного эталона.

Методы измерений. В ГПЭ на основе бесконтактного дистанционного оптического метода генерации и приема УЗ-волн реализован импульсный способ измерения скорости распространения сдвиговых УЗ-волн, который включает: одновременное дистанционное бесконтактное термооптическое возбуждение коротких, длительностью не более 40 нс на полувысоте, акустических импульсов продольных УЗ-волн и длительностью порядка 100 нс акустических импульсов сдвиговых УЗ-волн в плоскопараллельных мерах известной толщины d при помощи моноимпульсного твердотельного лазера;

дистанционную бесконтактную регистрацию последовательности акустических сигналов двухлучевым лазерным интерферометром;

измерение времени T_{12} пробега УЗ-импульсов продольных волн известной акустической базы, равной двойной толщине меры $2d$;

измерение времени t_S прихода сдвиговой составляющей УЗ-сигнала (с поправкой на собственные задержки установки) при известной акустической базе d .

Скорость распространения сдвиговых УЗ-волн вычисляется по формуле

$$C_S = d/t_S.$$

Для исключения влияния задержки сигнала в измерительном тракте временной интервал t_S находят как [6, 7]:

$$t_S = t_{JS} - t_{L1} + T_{12}/2 = T_{LS} + T_{12}/2,$$

где t_{JS} — измеренное «положение» сдвиговой составляющей сигнала; t_{L1} — время прихода переднего фронта первого пришедшего УЗ-импульса продольной волны; T_{LS} , T_{12} — временные интервалы между первым поступлением продольного и сдвигового УЗ-импульсов и первыми пришедшим и переотраженным продольными УЗ-импульсами, соответственно (рис. 1).

Временная форма импульса продольной волны подобна временной зависимости приложенного лазерного импульса, а волновой фронт сдвиговой волны имеет ступенчатый характер и повторяет временную зависимость поглощенной в по-

верхностном слое энергии светового импульса [6, 9]. Поэтому диапазон частот возбуждения сдвиговых волн составляет 10 МГц. Исследования показывают, что в случае возбуждения сдвиговых УЗ-волн оптическим способом эхо-импульсный метод измерения скорости УЗ-колебаний не применим, так как переотраженные импульсы смещений сдвиговой волны сравнимы с уровнем шума. Поэтому был использован метод измерений скорости распространения сдвиговых УЗ-волн, впервые предложенный в [7]. При этом измеряют временные интервалы между первыми импульсами продольной и сдвиговой волн $T_{LS} = t_{JS} - t_{L1}$ (см. рис. 1) и между первым и вторым (переотраженным) импульсами продольной волны T_{12} .

Время прихода сдвиговой составляющей УЗ-сигнала определяется следующим образом. При отношении сигнал—шум более пяти для сдвиговой составляющей измерения параметров t_{JS} и t_{L1} проводятся с использованием «временных» курсоров цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО) LeCroy WaveSurfer 422. Для этого на осциллограмме определяются точки «положения» сдвиговой составляющей сигнала и времени прихода переднего фронта первого пришедшего УЗ-импульса продольных волн. Далее в выбранные точки устанавливаются курсоры и считываются значения t_{JS} и t_{L1} . При отношении сигнал—шум менее пяти для измерений t_{JS} и t_{L1} применяется разработанное программное обеспечение в пакете Excel специальными аппроксимирующими функциями для импульсов продольных УЗ-волн и сдвиговой составляющей сигнала. При измерении параметра T_{12} используется метод совмещения импульсов на экране ЦЗО [1].

Толщину d меры скорости измеряют относительным методом при помощи контактного интерферометра типа ИКПВ с переменной ценой деления 0,05—0,2 мкм и набора концевых мер в семи точках поверхности исходной меры скорости: в центре и на границе осесимметричной зоны диаметром 30 мм. Среднее квадратическое отклонение результата измерений толщины меры не превышает $2 \cdot 10^{-4}$ мм.

В эталоне реализован импульсный метод измерений скорости распространения поверхностных УЗ-волн Рэлея, который включает:

дистанционное бесконтактное термооптическое возбуждение коротких, длительностью порядка 70 нс акустических импульсов поверхностных волн на поверхности плоскопараллельной меры;

дистанционную бесконтактную регистрацию акустических сигналов, распространяющихся по поверхности меры, при

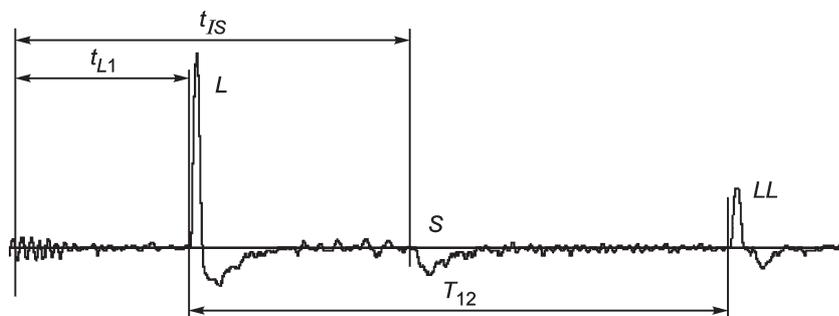


Рис. 1. Осциллограмма УЗ-импульсов:

L, LL — первые пришедший и переотраженный продольные импульсы;
S — сдвиговой импульс

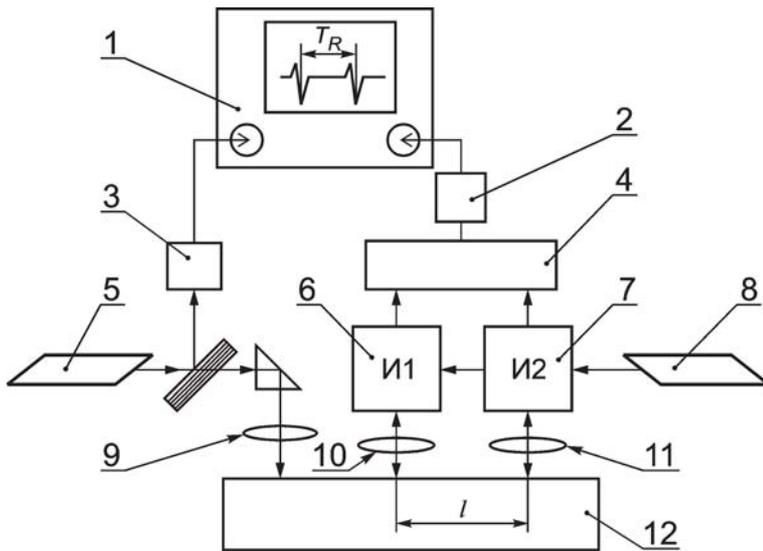


Рис. 2. Схема эталонной установки для измерений скорости распространения поверхностных УЗ-волн:

1 — цифровой осциллограф; 2 — широкополосный усилитель; 3, 4 — фотоприемники; 5, 8 — моноимпульсный и He—Ne-лазеры, соответственно; 6, 7 — интерферометры; 9, 10, 11 — фокусирующие линзы; 12 — мера скорости

помощи широкополосного лазерного интерферометрического приемника в двух точках этой поверхности, расположенных соосно с точкой возбуждения;

измерение времени T_R распространения акустических импульсов на известной фиксированной акустической базе (расстояние между точками приема) длиной l .

Скорость распространения поверхностных УЗ-волн вычисляется по формуле

$$C_R = l/T_R.$$

Метод измерения иллюстрирует рис. 2. Оптический сигнал от моноимпульсного твердотельного лазера 5 через короткофокусный объектив 9 формирует на поверхности исходной меры 12 термооптический источник поверхностных акустических волн диаметром 0,15 мм. Импульс УЗ-волны распространяется вдоль поверхности меры со скоростью C_R и регистрируется в двух точках поверхности, расположенных на одной оси с точкой возбуждения, широкополосным оптическим приемником, включающим два двухлучевых равноплечих лазерных интерферометра 6, 7, освещаемых общим He—Ne-лазером 8 [8, 9]. Зеркально полированная поверхность меры служит одним из зеркал в каждом интерферометре.

Принципиальной особенностью оптического приемника поверхностных УЗ-волн является минимизация размеров зоны приема путем фокусировки лазерного излучения на поверхности меры линзами 10, 11, размещенными непосредственно в рабочем плече интерферометров. Эффективный диаметр зон приема $d = 30$ мкм, что обеспечивает полосу воспроизведения частот оптического приемника 0,3—50 МГц и снижает систематическую погрешность изме-

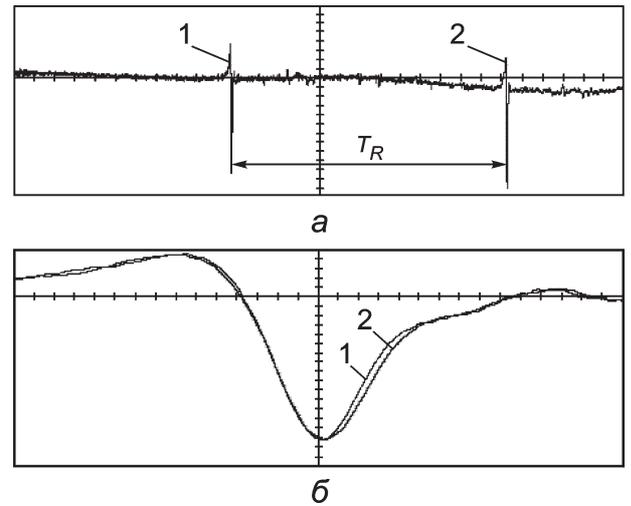


Рис. 3. Акустические сигналы 1, 2 поверхностных УЗ-волн при использовании меры из стекла К8, регистрируемые интерферометрами И1, И2 (а), и их совмещение на экране цифрового осциллографа (б):

а — 5 мкс/дел., 20 мВ/дел.; б — 50 нс/дел., 15 мВ/дел.

рений [8]. Оптический сигнал двух лазерных интерферометров преобразуется общим фотоприемником 4 в электрический и через широкополосный усилитель 2 подается на цифровой осциллограф 1, где записываются акустические сигналы. Для синхронизации системы регистрации предназначен фотоприемник 3.

Измерение интервала времени между парой УЗ-импульсов осуществляется методом совмещения импульсов на экране ЦЗО [1]. Пример записи двух акустических импульсов и их совмещения на экране осциллографа показан на рис. 3 а, б. Для измерения l (расстояния между центрами зон приема интерферометров) служит инструментальный микроскоп типа БМИ-1Ц с электронно-оптическим преобразователем и цифровым пересчетным устройством, имеющий разрешение 0,001 мм.

Состав эталона. Он содержит две эталонные установки для измерений скоростей распространения продольных и сдвиговых (первая) и поверхностных (вторая) УЗ-волн в твердых средах; три комплекта исходных мер скорости (продольных, сдвиговых и поверхностных УЗ-волн); блок температурных измерений. Состав и структурная схема первой установки рассмотрены в [1].

Эталонная установка для измерений скорости распространения поверхностных УЗ-волн включает: оптическую бесконтактную систему генерации УЗ-импульсов в твердых средах (мерах) на базе моноимпульсного твердотельного лазера; оптическую бесконтактную интерференционную систему приема УЗ-импульсов на базе двух стабилизированных двухлучевых лазерных интерферометров; оптический стенд для размещения и взаимной привязки систем генерации и приема УЗ-импульсов; контрольно-измерительную стойку с радиоэлектронной аппаратурой.

Конструктивно эталонная установка состоит из оптического измерительного стенда и контрольно-измерительной стойки. Оптический стенд служит для размещения и взаимной привязки лазеров, оптических элементов и систем юстировки, фотоприемников. В контрольно-измерительной стойке расположены серийная и специально разработанная радиоэлектронная аппаратура, входящая в состав установки.

Функционально установка содержит пять блоков: оптического возбуждения; оптической регистрации; измерения интервалов времени; синхронизации; контроля параметров акустических и оптических импульсов.

Блок оптического возбуждения включает моноимпульсный твердотельный лазер, работающий в режиме модуляции добротности, и оптическую систему наведения и фокусировки лазерного излучения, формирующую на поверхности мер оптико-акустический источник с требуемыми параметрами. Блок оптической регистрации обеспечивает бесконтактный прием акустических сигналов в широкой полосе частот и состоит из двух лазерных интерферометров; одномодового He—Ne-лазера, используемого в качестве источника когерентного монохроматического света в интерферометре; электронной системы стабилизации рабочей точки интерферометра; дифференциального фотоприемника; широкополосного усилителя.

Блок измерения временных интервалов предназначен для измерения времени распространения УЗ-импульсов на заданной акустической базе и включает измеритель временных интервалов, в качестве которого служит ЦЗО LeCroy WaveSurfer 422. Блок синхронизации обеспечивает временную синхронизацию момента запуска системы регистрации с моментом генерации светового импульса лазера и содержит оптическую систему, отводящую часть импульсного лазерного излучения на фотоприемник запуска; линию регулируемой временной задержки.

Блок контроля предназначен для визуального контроля и измерений амплитудно-временных параметров акустических импульсов при помощи ЦЗО и документирования сигналов на его жестком диске; контроля временных и энергетических параметров лазерных импульсов с использованием быстродействующего фотоприемника, цифрового осциллографа и измерителя энергии лазерного излучения.

Эталонные меры скорости, входящие в состав ГПЭ, должны удовлетворять следующим требованиям:

диапазоны скоростей УЗ-волн, воспроизводимых комплектом мер:
 продольных 5000—6500 м/с
 сдвиговых 2000—4000 м/с
 поверхностных 2000—3500 м/с

отклонение от параллельности рабочих поверхностей на диаметре 50 мм, не более 0,001 мм

отклонение от плоскостности рабочих поверхностей на диаметре 50 мм, не более 0,0004 мм

шероховатость рабочей поверхности со стороны регистрации акустических сигналов, не более 0,16 мкм

шероховатость рабочей поверхности со стороны генерации акустических сигналов, не более 0,32 мкм

коэффициент затухания УЗ-волн в мере, не более 150 дБ/м

дисперсия скорости УЗ-волн в мере, не более 10⁻⁴

Меры скорости — специально отобранные, подготовленные и исследованные образцы материалов (металлы и стекла), обеспечивающие хранение единицы скорости распространения УЗ-волн и ее воспроизведение в контрольных точках диапазона измерений скорости (внизу, середине иверху диапазона) при помощи эталонных установок. Выбор материалов мер обусловлен их акустическими свойствами и условием обеспечения требуемой точности измерений.

Эталонные меры скорости имели форму цилиндров. Соотношение между диаметром и толщиной мер выбирали из условия предотвращения появления ложных УЗ-импульсов, отраженных от боковой поверхности меры, внутри регистрируемого временного интервала. Для обеспечения этого условия необходимо соблюдать соотношения $D/d \geq 3$ (для временного интервала до второго эхо-импульса продольных УЗ-волн); $D/d \geq 5$ (для временного интервала до третьего эхо-импульса), где D, d — диаметр и толщина меры. Для поверхностных волн толщина мер составляла 30—40 мм.

Исследования показали, что наиболее перспективным материалом для исходных мер скорости является оптическое или кварцевое стекло. Преимущества стекол определяются, главным образом, их структурной однородностью, небольшим коэффициентом затухания и минимальной дисперсией скорости УЗ-волн, что обеспечивает распространение акустических сигналов в мере без искажений в рабочей полосе частот до 30 МГц.

Метрологические характеристики ГПЭ. Эталон воспроизводит единицу скорости распространения УЗ-волн в твердых средах:

продольных в диапазоне 5000—6500 м/с в полосе частот 0,5—25 МГц (коэффициент затухания не более 150 дБ/м) с относительным средним квадратическим отклонением результата измерений $S_o(\tilde{C}_L) \leq 4,6 \cdot 10^{-7}/d$ при одиннадцати

независимых наблюдениях (где d — безразмерный параметр, численно равный толщине меры в метрах). Относительная неисключенная систематическая погрешность $\Theta_o(\tilde{C}_L) \leq 1,4 \cdot 10^{-4}$;

сдвиговых в диапазоне 2000—4000 м/с в полосе частот 0,5—10 МГц (коэффициент затухания не более 150 дБ/м) с $S_o(\tilde{C}_S) \leq 5,0 \cdot 10^{-4}$ при 11—18 независимых наблюдениях и

$\Theta_o(\tilde{C}_S) \leq 2,0 \cdot 10^{-3}$;

поверхностных в диапазоне 2000—3500 м/с в полосе частот 0,3—30 МГц (коэффициент затухания не более 150 дБ/м) с $S_o(\tilde{C}_R) \leq 3,0 \cdot 10^{-5}$ при 18 независимых наблюдениях и

$\Theta_o(\tilde{C}_R) \leq 6,0 \cdot 10^{-5}$.

Стандартная неопределенность измерений не превышает значений, приведенных в таблице.

Стандартная неопределенность измерений скорости УЗ-волн

Неопределенность	Значение неопределенности для УЗ-волн		
	продольных	сдвиговых	поверхностных
u_A	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
u_B	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
u_C	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
U_p при $k = 2$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$

Основными источниками неопределенностей измерений скорости УЗ-волн являются: для продольных и сдвиговых — временная привязка УЗ-импульсов и дисперсия скорости в исходной мере; для поверхностных — временная привязка УЗ-импульсов и неточность определения акустической базы. Задачи снижения влияния этих источников будут решаться на этапах совершенствования эталона.

Передача размера единицы скорости рабочим эталонам 1-го разряда осуществляется при помощи комплектов исходных мер скорости. С учетом возможной акустической неоднородности мер скорости интервалы времени для продольных и сдвиговых УЗ-волн измеряют в пяти точках поверхности меры: в центре и четырех точках, расположенных через 90° на расстоянии $10 \pm 0,5$ мм от оси цилиндра. Число измерений в каждой точке $n = 11 \dots 18$. Для поверхностных УЗ-волн интервалы времени измеряют на трех базовых осях на поверхности меры скорости: на оси, проходящей через центр меры и на двух осях, расположенных параллельно на расстоянии $10 \pm 0,5$ мм от центральной оси. Число измерений интервалов времени на каждой оси $n = 18$. В качестве действительного значения скорости распространения УЗ-волн в мере принимают среднее арифметическое по результатам измерений в отдельных точках (на осях) поверхности меры.

Дальнейшее совершенствование эталона предполагает исследование и использование новых высокоточных методик измерений на базе корреляционного метода, с плавающим порогом и по центру тяжести импульса; применение современных лазеров и высокоточных СИ интервалов времени; разработку комплектов эталонных мер скорости для передачи размера единицы скорости распространения УЗ-волн в твердых средах; расширение частотного диапазона измерений для продольных УЗ-волн до 100 МГц.

С учетом результатов эксплуатации эталона планируется создать теоретическую и экспериментальную базы для измерений физико-механических характеристик твердых сред.

Л и т е р а т у р а

1. **Базылев П. В. и др.** Государственный первичный эталон единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых средах // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 7—10; **Bazylev P.V. et al.** National primary standard for the unit of the propagation velocity of ultrasonic waves in solids // Measurement Techniques. 2012. V. 54. N 11. P. 1219—1224.

2. **Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А.** Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / Под ред. И. Н. Францевича. Киев: Наукова думка, 1982.

3. **Ланге Ю. В.** Ультразвуковая дефектоскопия вчера, сегодня, завтра // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 14—19.

4. **Неразрушающий контроль:** Справочник. В 7 т. Т. 3. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль / Под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004.

5. **Scruby C. B.** Some application of laser ultrasound // Ultrasonics. 1989. V. 27. N 4. P. 195—209.

6. **Бондаренко А. Н., Дробот Ю. Б., Кондратьев А. И.** Прецизионные акустические измерения оптическими и емкостными методами. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1990.

7. **Архипов В. И., Бондаренко А. Н., Кондратьев А. И.** Оптический метод измерения скорости сдвиговых волн // Измерительная техника. 1984. № 3. С. 27—28; **Arkhipov V. I., Bondarenko A. N., Kondrat'ev A. I.** Optical method of measuring the shear wave velocity // Measurement Techniques. 1984. V. 27. N 3. P. 221—223.

8. **Луговой В. А., Базылев П. В.** Прецизионные методы и средства исследований параметров акустических сигналов различных типов волн в твердых средах. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011.

9. **Базылев П. В., Бондаренко А. Н., Луговой В. А.** Лазерная установка для измерения скорости распространения поверхностных волн Рэлея // Дефектоскопия. 1990. № 10. С. 91—93.

Дата принятия 08.04.2013 г.