

**II. Передача размера единиц величин,
прослеживаемость к первичным эталонам**

УДК 006.91:53.082.4

**ЭТАЛОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
ЕДИНИЦЫ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ
ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
В ТВЁРДЫХ СРЕДАХ В СОСТАВЕ ГЭТ 189-2014**

П.В. Базылев, И.Я. Крумголец, В.А. Луговой

*Дальневосточный филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», Хабаровск,
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
lugovoy@dst.khv.ru*

Представлена эталонная установка для воспроизведения единицы коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в твёрдых средах на основе бесконтактных ёмкостных методов генерации и приёма ультразвуковых колебаний с применением эхо-импульсного и резонансного методов измерений, входящая в состав Государственного первичного эталона ГЭТ 189-2014.

A standard for reproducing the unit of attenuation coefficient of longitudinal ultrasonic waves in solid media based on contactless capacitive methods of generating and receiving ultrasonic oscillations using echo-pulse and resonant measurement methods, which is part of the State Primary Standard GET 189-2014, is presented.

Ключевые слова: Государственный первичный эталон, ультразвуковые волны, коэффициент затухания, ёмкостный преобразователь, эхо-импульсный метод, резонансный метод.

Key words: State primary standard, ultrasonic waves, attenuation coefficient, capacitive transducer, echo-pulse method, resonance method.

Одним из направлений совершенствования Государственного первичного эталона ГЭТ 189 является расширение его измерительных возможностей в области измерений коэффициента затухания различных типов ультразвуковых (УЗ) волн в твёрдых средах, прежде всего продольных, сдвиговых (поперечных) и поверхностных УЗ волн.

Скорость распространения и коэффициент затухания УЗ волн служат важнейшими акустическими параметрами твёрдых сред, связанными с их физическими свойствами и физико-механическими характеристиками. Требования к точности и достоверности измерений скорости распространения и коэффициента затухания УЗ волн определяется задачами фундаментальных и прикладных исследований, а также необходимостью обеспечения единства измерений в области ультразвукового неразрушающего контроля.

Исследования показывают, что наиболее перспективными направлениями разработки исходных эталонов в области акустики твёрдых сред является применение бесконтактных широкополосных методов генерации и приёма УЗ волн, при этом для измерений коэффициента затухания продольных УЗ волн в твёрдых средах более предпочтительны ёмкостные методы возбуж-

дения и регистрации акустических волн в сочетании с эхо-импульсным и резонансным методами измерений [1, 2].

В результате работ по совершенствованию Государственного первичного эталона (ГПЭ) в состав ГЭТ 189 была введена новая эталонная установка, предназначенная для воспроизведения, хранения и передачи единицы коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в твёрдых средах (дБ/м) в диапазоне значений коэффициента затухания 0,2–500 дБ/м и диапазоне частот 1–50 МГц.

ГПЭ получил новое наименование: Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твёрдых средах ГЭТ 189-2014.

Состав ГЭТ 189-2014. В настоящее время ГПЭ состоит из трёх эталонных установок (для измерений скоростей распространения продольных и сдвиговых УЗ волн, скорости распространения поверхностных УЗ волн, коэффициента затухания продольных УЗ волн), трёх комплектов исходных эталонных мер скорости (на каждый тип волн) и комплекта исходных мер коэффициента затухания, блока температурных измерений для контроля температуры окружающей среды и эталонных мер. Методы измерений, состав и структурные схемы первых двух лазерно-интерференционных эталонных установок рассмотрены в [3, 4].

Состав установки. Установка для воспроизведения, хранения и передачи единицы коэффициента затухания продольных УЗ волн в твёрдых средах представляет электронно-измерительный комплекс на основе бесконтактных ёмкостных методов возбуждения и регистрации УЗ волн с использованием широкополосных ёмкостных преобразователей с тонкоплёночным оксидным диэлектриком [5]. Данные ёмкостные преобразователи (ЕП) имеют диапазон рабочих частот (0,1–400) МГц, постоянный коэффициент преобразования по смещению при возбуждении УЗ волн $5 \cdot 10^{-11}$ м/В, высокую чувствительность 10^8 В/м и низкий порог чувствительности $2 \cdot 10^{-17}$ м/Гц^{1/2} при регистрации УЗ волн, не требуют перенастройки установки при измерениях во всём рабочем диапазоне частот.

Конструктивно и функционально эталонная установка состоит из следующих элементов: бесконтактная система генерации УЗ колебаний в мерах, включающая ЕП в режиме генерации, генератор радиоимпульсов и анализатор спектра; бесконтактная система регистрации УЗ колебаний, включающая ЕП в режиме приёма, предварительный усилитель и полосовой усилитель; устройство для перемещения преобразователей и установки мер (УПП); стенд для размещения отдельных узлов установки (УПП, источники поляризующего напряжения ЕП, широкополосный усилитель УЗ-33); контрольно-измерительная стойка с радиоэлектронной аппаратурой, включающая цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) LeCroy WaveSurfer 422,

анализатор спектра GSP-7830, генератор радиоимпульсов, полосовой усилитель. Блок-схема установки показана на рис. 1.

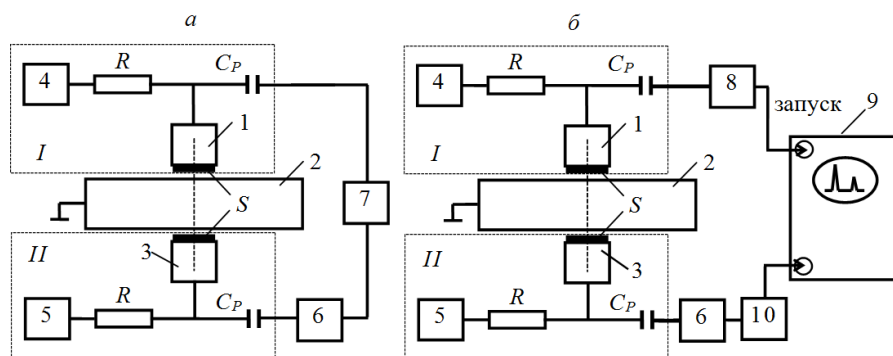


Рис. 1. Схема эталонной установки для измерений α_L резонансным (а) и эхо-импульсным (б) методами. I, II — возбуждающий и приёмный ЕП. 1, 3 — электроды; 2 — образец; 4, 5 — источники постоянного поляризующего напряжения; 6 — предусилитель; 7 — анализатор спектра; 8 — генератор радиоимпульсов; 9 — цифровой осциллограф; 10 — полосовой усилитель. S — диэлектрический слой; C_p — разделительный конденсатор; R — зарядное сопротивление

Одним из основных узлов установки является УПП (рис. 2), обеспечивающее установку, перемещение и юстировку излучающего и приёмного ЕП, установку и фиксацию меры коэффициента затухания и возможность её поперечного перемещения относительно центра ЕП.

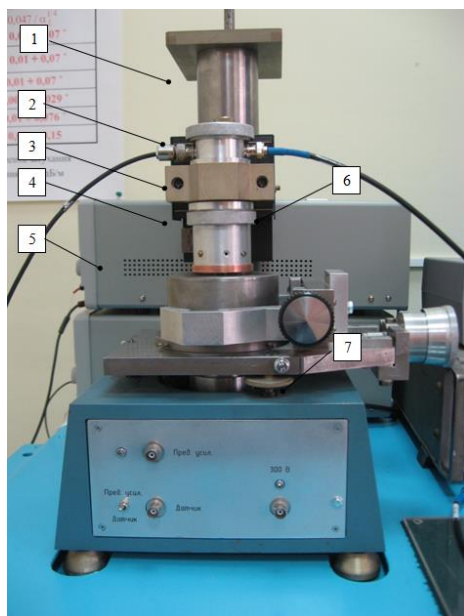


Рис. 2. Устройство для перемещения преобразователей и установки мер (УПП)

Размеры УПП 300×250×500 мм. Излучающий ЕП 2 закреплён с помощью устройства фиксации 3 на стойке 1 и может перемещаться в вертикальном направлении, что позволяет работать с мерами различной толщины (1–100 мм). Приёмный ЕП располагается в станине 7 на устройстве юстировки 5, обеспечивающем перемещение ЕП в горизонтальной плоскости для достижения соосности преобразователей. Мера 4 устанавливается и фиксируется с помощью зажимов в устройстве перемещения мер 6, допускающем её поперечное перемещение относительно оси ЕП в диапазоне 0–20 мм.

Генератор радиоимпульсов и полосовой усилитель выполнены на современной элементной базе в виде отдельных блоков. Генератор радиоимпульсов включает в себя: блок управления, цифровой программируемый синтезатор частот, формирователь пачки импульсов, выходной усилитель; и обеспечивает следующие технические характеристики:

- несущие частоты, МГц: 0,50; 0,625; 1,00; 1,25; 2,0; 2,50; 4,0; 5,0; 8,0; 10,0; 16,0; 20,0; 32,0; 40,0;
- амплитуда радиоимпульсов — 10 В;
- частота следования — от 100 Гц до 1 кГц;
- длительность радиоимпульсов — от 1 до 40 периодов;
- нестабильность несущей частоты — $1 \cdot 10^{-5}$ Гц.

Полосовой усилитель предназначен для работы установки в радиоимпульсном режиме и состоит из блока полосовых фильтров (блок фильтрации) и усилителя, блока управления. Переключение полос пропускания — электронное. Средняя частота полос пропускания усилителя соответствует несущим частотам генератора радиоимпульсов.

Методы измерений. В эталонной установке реализованы два метода измерений коэффициента затухания α_L продольных УЗ волн в диапазоне частот 1–50 МГц — резонансный и эхо-импульсный методы [1], каждый из которых обеспечивает требуемую точность в определённом диапазоне α_L . Резонансный метод используется для измерений α_L в диапазоне 0,2–100 дБ/м, эхо-импульсный метод — в диапазоне 80–500 дБ/м.

Это обусловлено тем, что для резонансного метода измерений с возрастанием частоты продольных УЗ волн (и, соответственно, ростом затухания) при значениях $\alpha_L > 100$ дБ/м существенно снижается амплитуда резонансных акустических спектральных линий (АСЛ); для эхо-импульсного метода с уменьшением частоты при значениях $\alpha_L < 80$ дБ/м уменьшается отношение амплитуд двух переотражённых УЗ импульсов, что приводит к возрастанию погрешностей измерений.

Оба метода обеспечивают проведение измерений скорости распространения продольных УЗ волн с расширенной неопределённостью не более $1 \cdot 10^{-3}$.

Резонансный метод измерений коэффициента затухания продольных УЗ волн заключается в следующем:

- бесконтактное возбуждение в плоскопараллельной мере толщиной d с помощью широкополосного излучающего ЕП и внутреннего генератора анализатора спектра непрерывных УЗ колебаний с частотой, изменяемой в диапазоне 1–50 МГц;
- бесконтактная регистрация с помощью широкополосного приёмного ЕП, расположенного соосно с излучающим ЕП на противоположной поверхности меры, и приёмного блока анализатора спектра сформировавшихся в мере акустических спектральных линий (АСЛ) на частотах, кратных удвоенной толщине меры;
- измерение ширины ΔF АСЛ с номером n по заданному уровню $\beta = 0,707$ от максимума, положение которой наиболее близко к требуемой частоте УЗ колебаний, и частоты $f_{\max}$ максимума данной АСЛ. Число измерений $n_F = 7 \dots 11$;
- измерение скорости распространения продольных УЗ волн C_L ;
- вычисление поправки, учитывающей потери энергии в окружающую среду.

Коэффициент затухания в резонансном режиме работы вычисляется по формуле:

$$\alpha_L = \frac{20}{\ln 10} \frac{\pi(\Delta F - \Delta F_n)}{C_L},$$

где ΔF — измеренное значение ширины АСЛ; ΔF_n — поправка, учитывающая потери энергии в окружающую среду [1].

Значение C_L в резонансном режиме работы рассчитывается по формуле

$$C_L = 2df_{\max}/n.$$

Структурная схема установки при измерениях резонансным методом показана на рис. 1а. С выхода анализатора спектра 10 сигнал подаётся на возбуждающий ЕП I и с приёмного ЕП II через предусилитель 6 возвращается на вход анализатора. Анализируя картину формирования АСЛ, выбирают требуемую АСЛ, положение которой наиболее близко к заданной частоте УЗ колебаний, и проводят измерения $f_{\max}$ и ΔF .

Эхо-импульсный метод измерений коэффициента затухания продольных УЗ волн заключается в следующем:

- бесконтактное возбуждение в мере толщиной d с помощью широкополосного излучающего ЕП радиоимпульсов продольных УЗ волн с заданной несущей частотой в диапазоне 1–50 МГц длительностью от 1 до 40 периодов;
- бесконтактная регистрация с помощью широкополосного приёмного ЕП последовательности затухающих по амплитуде переотражённых в мере УЗ импульсов;

- измерение ослабления A_{km} переотражённых УЗ импульсов (отношения амплитуд A_k к A_m выбранной пары УЗ импульсов в децибелах). Число измерений $n_A = 7 \dots 11$;
- измерение скорости распространения C_L продольных УЗ волн для определения дифракционной поправки.

Коэффициент затухания продольных УЗ волн вычисляется по формуле:

$$\alpha_L = \frac{A_{km} - \Delta A_d}{2d(m-k)},$$

где ΔA_d — дифракционная поправка; k, m — номера переотражённых УЗ импульсов ($m > k$).

Введение дифракционной поправки связано с достаточно большим диаметром электродов ЕП (10 или 20 мм). Для определения ΔA_d требуется значение C_L , измеряемое на данной установке.

Значение C_L в эхо-импульсном режиме работы рассчитывается по формуле

$$C_L = 2d(m-k) / t_{km},$$

где t_{km} — временной интервал между k -м и m -м переотражёнными УЗ импульсами.

Структурная схема установки при измерениях эхо-импульсным методом показана на рис. 1б. Радиоимпульс требуемой амплитуды, длительности и частоты заполнения f , формируемый генератором радиоимпульсов 8, с помощью излучающего ЕП I, образованного возбуждающим электродом 1 и проводящей поверхностью меры 2, преобразуется в УЗ импульс с той же частотой заполнения f . Переотражённые в мере 2 УЗ импульсы с помощью приёмного ЕП II, образованного приёмным электродом 3 и поверхностью меры 2, преобразуются в электрический сигнал, который усиливается и детектируется на частоте f . Сигнал с приёмного ЕП через предусилитель 6 и полосовой усилитель 7 подаётся на вход ЦЗО 9. Переотражённые УЗ импульсы регистрируются в режиме «усреднение», которое существенно повышает отношение сигнал–шум. Обработка цифровой записи осциллограмм производится либо непосредственно на ЦЗО, либо на персональном компьютере в пакете Excel. При измерениях параметров t_{km} и A_{km} с помощью осциллографа используется метод совмещения импульсов на экране ЦЗО [3].

Эталонные меры коэффициента затухания продольных УЗ волн. Меры коэффициента затухания, входящие в состав ГПЭ, представляют специально отобранные, подготовленные и исследованные образцы материалов, которые обеспечивают хранение единицы коэффициента затухания продольных УЗ волн, её воспроизведение с помощью эталонной установки в контрольных точках диапазона измерений 0,2–500 дБ/м на частотах 1–50 МГц с необходимой точностью и передачу единицы рабочим эталонам.

Выбор материалов мер обусловлен их акустическими характеристиками, кроме того, данные материалы часто используют в методиках поверки средств УЗ неразрушающего контроля.

Метрологические характеристики эталонной установки. Результаты измерений коэффициента затухания продольных УЗ волн резонансным и эхо-импульсным методами показывают, что полученные двумя методами измерений значения коэффициента затухания в точках перекрытия диапазонов измерений совпадают в пределах погрешности измерений. Метрологические характеристики эталонной установки приведены в таблице.

Характеристика	Коэффициент затухания продольных УЗ волн
Диапазон воспроизведения единицы, дБ/м	0,2–500
Рабочий диапазон частот, МГц	1–50
СКО результата измерений S_0	0,01–0,07*
Границы НСП результата измерений Θ_0 ($P = 0,99$)	0,01–0,07*
Стандартная неопределённость: по типу A по типу B	0,01–0,07* 0,004–0,03*
Суммарная стандартная неопределённость	0,01–0,076*
Расширенная неопределённость ($k = 2$)	0,02–0,15*

Примечание: * — максимальное значение, в зависимости от толщины меры, частоты и коэффициента затухания.

Значение относительного СКО S_0 можно также выразить формулой $0,047/\alpha_L^{1/4}$, где α_L — безразмерный параметр, численно равный значению коэффициента затухания в дБ/м.

Основными источниками НСП измерений коэффициента затухания УЗ волн являются НСП измерения ослабления (отношения амплитуд) УЗ импульсов и ширины АСЛ; НСП определения дифракционных поправок; НСП, связанные с несоосностью электродов преобразователей, нестабильностью и погрешностью измерения температуры меры, шероховатостью поверхности и неоднородностью материала меры.

Передача единицы коэффициента затухания продольных УЗ волн от ГПЭ рабочим эталонам 1-го разряда (установкам для измерения коэффициента затухания продольных УЗ волн) согласно государственной поверочной схеме осуществляется методом сличения с помощью меры с использованием комплекта исходных мер коэффициента затухания, входящего в состав ГПЭ.

Заключение

Дальнейшим развитием работ является метрологическое обеспечение измерений коэффициента затухания сдвиговых УЗ волн. Так, например, значительная часть ультразвукового контроля объектов, изделий и материалов производится с помощью сдвиговых ультразвуковых волн с применением настроечных образцов. Если для контроля однотипных объектов использовать однотипные настроечные образцы и одну и ту же методику, то результаты контроля могут сильно различаться, т.к. собственно затухание сдвиговых УЗ волн в материале образцов может отличаться и в настоящее время не нормируется и не измеряется с необходимой достоверностью.

Поэтому первостепенной задачей совершенствования эталонной базы в области ультразвуковых измерений в твёрдых средах следует считать создание эталонной установки для измерения коэффициента затухания ультразвуковых сдвиговых волн и её введение в состав ГПЭ, дополнение поверочной схемы эталонами и средствами измерений коэффициента затухания сдвиговых ультразвуковых волн в твёрдых средах.

Литература

1. Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твёрдых сред. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006.
2. Луговой В.А., Базылев П.В. Прецизионные методы и средства исследований параметров акустических сигналов различных типов волн в твёрдых средах. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011.
3. Базылев П.В., Изотов А.В., Кондратьев А.И., Луговой В.А., Нигай В.П., Окишев К.Н. Государственный первичный эталон единицы скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твёрдых средах // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 7–10.
4. Базылев П.В., Изотов А.В., Кондратьев А.И., Луговой В.А., Окишев К.Н. Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твёрдых средах // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 6–10.
5. Луговой В.А., Троценко В.П. Высокостабильный ёмкостный преобразователь ультразвуковых сигналов // ПТЭ. 1986. № 3. С. 194–195.
6. Кондратьев А.И., Король А.А., Жукова М.С. Определение дифракционных поправок по коэффициенту затухания ультразвуковых волн для резонансного режима измерений // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 53–57.