

## Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твёрдых средах ГЭТ 189—2014

П. В. БАЗЫЛЕВ, И. С. ДОРНИН, А. И. КОНДРАТЬЕВ, И. Я. КРУМГОЛЬЦ,  
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 Государственного первичного эталона единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твердых средах. Описана новая эталонная установка для воспроизведения единицы коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн на основе бесконтактных емкостных методов генерации, а также приема ультразвуковых колебаний с применением эхо-импульсного и резонансного методов измерений. Приведены метрологические характеристики Государственного первичного эталона единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твердых средах ГЭТ 189—2014.

**Ключевые слова:** государственный первичный эталон, ультразвуковые волны, коэффициент затухания, емкостный преобразователь, эхо-импульсный метод, резонансный метод, воспроизведение единицы.

The results of improvement of the state primary standard of velocities units of propagation of longitudinal, shear and surface ultrasonic waves in solids are considered. A new reference installation is described for reproducibility of the unit of attenuation factor of longitudinal ultrasonic waves on the basis of non-contact capacitance methods for generating and receiving of ultrasonic vibrations using echo technique and resonance measurement methods. The metrological characteristics of the primary units standard are given.

**Key words:** state primary standard, ultrasonic waves, attenuation factor, capacitance transducer, echo technique, resonance method, unit reproducibility.

В 2013—2014 гг. были продолжены работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твёрдых средах ГЭТ 189—2012 [1, 2]. В результате разработана и введена в его состав новая эталонная установка, предназначенная для воспроизведения, хранения и передачи единицы коэффициента затухания продольных ультразвуковых (УЗ) волн в твёрдых средах — децибел на метр (дБ/м). Таким образом, значительно расширены функциональные и измерительные возможности государственного первичного эталона (ГПЭ), позволяющие обеспечить единство измерений основных параметров распространения УЗ-волн в твёрдых средах — скорости распространения различных типов акустических волн и коэффициента затухания продольных УЗ-волн. Модифицированный ГПЭ получил регистрационный номер ГЭТ 189—2014 и новое название Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твёрдых средах.

Потребность в измерениях параметров распространения УЗ-волн в твердых средах определяется задачами как фундаментальных, так и прикладных исследований. С помощью этих параметров рассчитывают упругие постоянные и модули упругости — важнейшие характеристики твёрдого тела [3], определяют физико-механические характеристики и прочностные свойства твёрдых сред, что основано на чувствительности параметров УЗ-волн, распространяющихся в объекте исследований [4, 5].

Потребность в измерениях параметров распространения УЗ-волн связана с необходимостью обеспечения единства измерений в области неразрушающего контроля качества материалов и изделий с использованием акустических методов и средств. Ультразвуковой неразрушающий контроль в настоящее время является одним из основных и наиболее надёжных, достоверных и информативных методов оценки состояния материалов и изделий [6—8].

Вопрос о точности и достоверности измерений скорости распространения и коэффициента затухания различных типов УЗ-волн, обеспечении единства акустических измерений в твёрдых средах весьма актуален. Анализ отечественной и зарубежной литературы в данной области измерений показывает, что наиболее перспективными направлениями разработки исходных эталонов в акустике твёрдых сред является применение бесконтактных широкополосных методов генерации и приема УЗ-волн: оптического и ёмкостного [9—13].

Оптические методы возбуждения и регистрации ультразвука были положены в основу создания эталонных установок для измерений скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных УЗ-волн в твёрдых средах в составе ГЭТ189—2012 [1, 2]. Дальнейшее совершенствование ГПЭ заключалось в разработке эталонной установки для измерений коэффициента затухания продольных УЗ-волн в твёрдых средах на базе ёмкостных методов возбуждения и регистрации акустических волн, которые более предпочтительны для решения данной измерительной задачи [11, 12].

При этом также был учтён опыт работ по созданию и эксплуатации с 1991 г. установки высшей точности УВТ 73-А-91 [14].

**Состав ГЭТ 189—2014.** В настоящее время эталон состоит из трёх эталонных установок (для измерений скоростей распространения продольных и сдвиговых, поверхностных УЗ-волн и коэффициента затухания продольных УЗ-волн), трёх комплектов исходных эталонных мер скорости (на каждый тип волн) и комплекта исходных мер коэффициента затухания, а также блока температурных измерений для контроля температуры окружающей среды и мер. Методы измерений, состав и структурные схемы первых двух лазерно-интерференционных эталонных установок рассмотрены в [1, 2].

В данной работе представлена новая эталонная установка в составе ГПЭ, предназначенная для воспроизведения, хранения и передачи единицы коэффициента затухания продольных УЗ-волн в твёрдых средах в диапазонах коэффициента затухания 0,2—500 дБ/м и частот 1—50 МГц.

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 (ЕП) с тонкоплёночным оксидным диэлектриком [11—15]. Данные ЕП имеют диапазон 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  $2 \cdot 10^{-17}$  мГц<sup>1/2</sup> при регистрации УЗ-волн, не требуют перенастройки установки при измерениях во всём рабочем диапазоне частот. Это позволяет применять их для прецизионных акустических измерений.

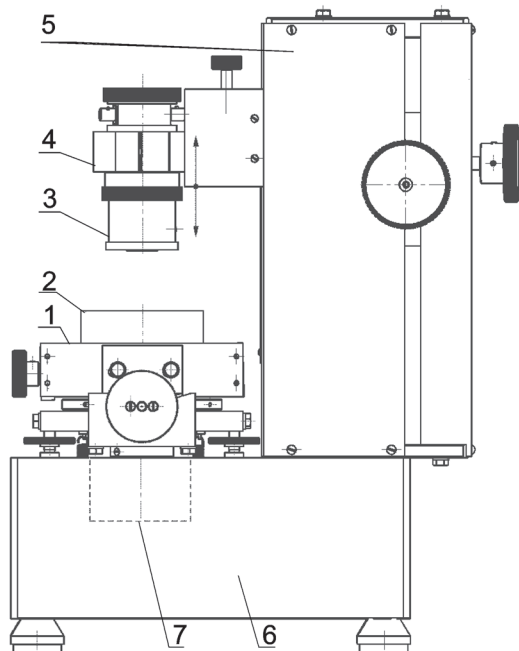


Рис. 1. Структурная схема устройства для перемещения преобразователей и установки мер:

1 — устройство юстировки мер и приёмного ЕП; 2 — мера коэффициента затухания; 3 — излучающий ЕП; 4 — устройство фиксации излучающего ЕП; 5 — вертикальная стойка для перемещения излучающего ЕП; 6 — станина; 7 — приёмный ЕП с предусилителем (в одном корпусе)

Конструктивно и функционально эталонная установка состоит из следующих элементов: бесконтактной системы генерации УЗ-колебаний в мерах, включающей ЕП в режиме генерации, генераторы радиоимпульсов и анализатор спектра; бесконтактной системы регистрации УЗ-колебаний, содержащей ЕП в режиме приёма, предварительный усилитель и полосовой усилитель; устройства для перемещения преобразователей и установки мер (УПП); станда для размещения отдельных узлов установки (УПП, источников поляризующего напряжения ЕП, широкополосного усилителя УЗ-33); контрольно-измерительной стойки с радиоэлектронной аппаратурой, включающей цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО) LeCroy WaveSurfer 422, анализатор спектра GSP-7830, генератор радиоимпульсов, полосовой усилитель.

Одним из основных узлов установки является УПП, обеспечивающее крепление, перемещение и юстировку излучающего и приёмного ЕП, установку и фиксацию меры коэффициента затухания и её поперечное перемещение в диапазоне 0—20 мм от центра ЕП. Структурная схема УПП приведена на рис. 1. Размеры УПП 300×250×500 мм. Излучающий ЕП 3 закреплён с помощью устройства фиксации 4 на стойке 5 и может перемещаться в вертикальном направлении. Размещение меры 2 в УПП и установка ЕП в рабочее положение на поверхность меры обеспечивают работу с мерами различной толщины (1—100 мм). Приёмный ЕП 7 с предусилителем располагается в станине 6 и позволяет проводить юстировку в горизонтальной плоскости для достижения соосности преобразователей. Мера устанавливается и фиксируется с помощью зажимов в устройстве юстировки 1, допускающем её поперечное перемещение относительно оси ЕП.

**Методы измерений.** В установке реализованы два метода измерений коэффициента затухания  $\alpha_L$  продольных УЗ-волн — эхо-импульсный и резонансный [11, 12], каждый из которых обеспечивает требуемую точность в определённом диапазоне  $\alpha_L$ . Эхо-импульсный метод используется для измерений  $\alpha_L$  в диапазоне 80—500 дБ/м, резонансный метод — в диапазоне 0,2—100 дБ/м.

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

бесконтактное возбуждение с помощью широкополосного ЕП в плоскопараллельной мере толщиной  $d$  коэффициента затухания УЗ-радиоимпульсов с заданной несущей частотой в диапазоне 1—50 МГц длительностью 1—40 периодов;

бесконтактная регистрация с помощью широкополосного приёмного ЕП, расположенного соосно с излучающим ЕП на противоположной поверхности меры, последовательно по амплитуде переотражённых в мере УЗ-импульсов (рис. 2, а);

измерение ослабления  $A_{km}$  переотражённых УЗ-импульсов (отношения амплитуд  $A_k$  к  $A_m$  выбранной пары УЗ-импульсов в децибелах). В зависимости от материала меры число измерений  $n_A = 7 \dots 11$ ;

измерение скорости распространения  $c_L$  продольных УЗ-волн для определения дифракционной поправки.

На рис. 2, а приведены осциллограммы УЗ-импульсов.

Коэффициент затухания продольных УЗ-волн вычисляется по формуле [11, 12]:

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

где  $\Delta A_d$  — дифракционная поправка;  $k, m$  — номера переотражённых УЗ-импульсов ( $m > k$ ).

Введение дифракционной поправки обусловлено достаточно большим диаметром электродов ЕП, который составляет 10—20 мм. Поправка  $\Delta A_d$  вычисляется с использованием пакета Excel. Для определения  $\Delta A_d$  требуется значение  $c_L$  [11, 12], измеряемое на данной установке с погрешностью порядка 0,1 %. Значение  $c_L$  можно рассчитать 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. 3, а. 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 (рис. 2, а) [1].

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

бесконтактное возбуждение с помощью широкополосного ЕП и внутреннего генератора анализатора спектра в мере толщиной  $d$  затухания непрерывных УЗ-колебаний с плавно меняющейся частотой в диапазоне 1—50 МГц;

бесконтактная регистрация с помощью широкополосного приёмного ЕП и приёмного блока анализатора спектра сформировавшихся в мере акустических спектральных линий (АСЛ);

измерение ширины  $\Delta F$  АСЛ с номером  $n$  по заданному уровню  $\beta$ , положение которой наиболее близко к требуемой частоте УЗ-колебаний, и частоты  $f_{\max}$  максимума данной АСЛ. Обработка АСЛ проводится с использованием измерительных маркеров анализатора спектра. Число измерений  $n_F = 7 \dots 11$ ;

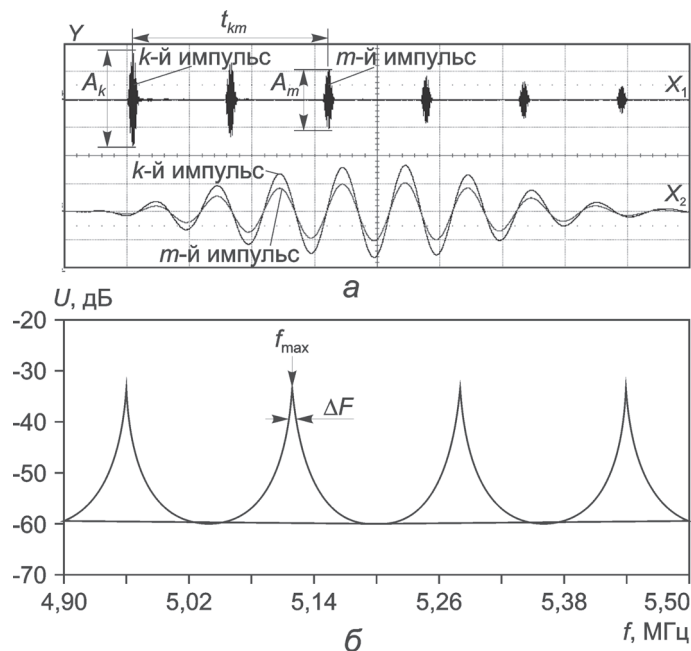


Рис. 2. Акустические сигналы продольной ультразвуковой волны: а — осциллограммы УЗ-импульсов, эхо-импульсный режим, мера № 2,  $f = 10$  МГц, вверху — последовательность переотражённых в мере УЗ-импульсов, 5 мкс/дел. ( $X_1$ ), 10 мВ/дел. ( $Y$ ); внизу — совмещённые на экране цифрового осциллографа  $k$ -й и  $m$ -й УЗ-импульсы, 100 нс/дел. ( $X_2$ ), 10 мВ/дел. ( $Y$ ); б — спектрограмма акустических спектральных линий, резонансный режим, мера № 2,  $f_{\max} = 5,12$  МГц, 0,06 МГц/дел. ( $X$ ), 10 дБ/дел. ( $Y$ )

измерение скорости продольных УЗ-волн  $c_L$ ;  
вычисление дифракционной поправки и поправки, учитывающей потери энергии в окружающую среду.

На рис. 2, б приведена спектрограмма АСЛ.

Коэффициент затухания в резонансном режиме работы вычисляется по формуле [11, 12]:

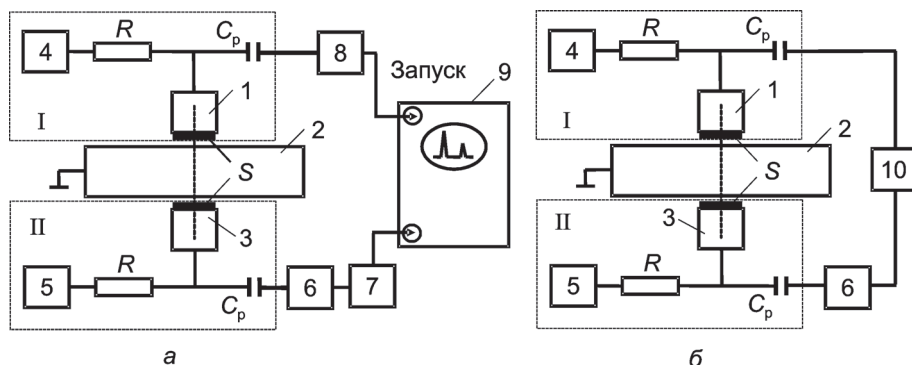


Рис. 3. Схема эталонной установки при измерениях коэффициента затухания  $\alpha_L$  продольных УЗ-волн эхо-импульсным (а) и резонансным (б) методами:

I, II — возбуждающий и приёмный ЕП; 1, 3 — электроды; 2 — мера; 4, 5 — источники постоянного поляризующего напряжения; 6 — предусилитель; 7 — полосовой усилитель; 8 — генератор радиоимпульсов; 9 — цифровой осциллограф; 10 — анализатор спектра; S — диэлектрический слой;  $C_p$  — разделительный конденсатор; R — зарядное сопротивление

$$\alpha_L = \frac{20}{\ln 10} \frac{\pi \Delta F_{\text{и}}}{c_L},$$

где  $\Delta F_{\text{и}} = \Delta F - \Delta F_{\text{д}} - \Delta F_{\text{п}}$  — исправленное значение ширины АСЛ;  $\Delta F$  — измеренное значение ширины АСЛ по уровню  $\beta = 0,707$ ;  $\Delta F_{\text{д}}$  — дифракционная поправка [16];  $\Delta F_{\text{п}}$  — поправка, учитывающая потери энергии в окружающую среду [11]; поправка  $(\Delta F_{\text{д}} + \Delta F_{\text{п}})$  вычисляется с использованием пакета Excel.

Значение  $c_L$  в резонансном режиме работы определяется как

$$c_L = 2df_{\text{max}}/n.$$

Структурная схема установки при измерениях резонансным методом показана на рис. 3, б. С выхода анализатора спектра 10 сигнал подается на возбуждающий ЕП I и с приёмного ЕП II через предусилитель 6 возвращается на вход анализатора. Анализируя картину формирования АСЛ [11, 16], выбирают требуемую АСЛ, положение которой наиболее близко к частоте УЗ-колебаний. Используя метки анализатора спектра, определяют  $f_{\text{max}}$  и  $\Delta F$ .

**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. Требования к геометрическим параметрам исходных мер коэффициента затухания и мер скорости в целом аналогичны [1, 2].

Состав комплекта мер коэффициента затухания, геометрические размеры мер (диаметр  $D$  и толщина  $d$ ), скорость продольных УЗ-волн  $c_L$  и границы погрешности результата измерений (при  $P = 0,99$ ) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные меры коэффициента затухания

| Мера                     | $D$ , мм | $d$ , мм | $c_L$ , м/с |
|--------------------------|----------|----------|-------------|
| № 1. Сплав Д16Т          | 110      | 15,062   | 6405±10     |
| № 2. Сплав Д16Т          | 110      | 25,041   | 6410±10     |
| № 3. Бронза              | 110      | 14,982   | 4897±10     |
| № 4. Латунь Л63          | 110      | 25,072   | 4435±10     |
| № 5. Сталь Х18Н10Т       | 110      | 15,000   | 5730±10     |
| № 6. Сталь Х18Н10Т       | 110      | 25,055   | 5740±10     |
| № 7. Кварцевое стекло КВ | 100×100  | 19,948   | 5963±5      |
| № 8. Сталь ХГ            | 41×59    | 8,650    | 5909±10     |

Результаты измерений коэффициента затухания продольных УЗ-волн эхо-импульсным и резонансным методами для ряда мер и составляющие погрешности измерений приведены в табл. 2. Относительное среднее квадратическое отклонение (СКО)  $S_0$  и границы неисключенной систематической погрешности (НСП)  $\Theta_0$  результатов измерений составляют соответственно 0,01—0,07 и 0,002—0,07 в зависимости от коэффициента затухания на данной частоте и толщины мер. Частотные зависимости коэффициента затухания для всех исходных мер носят монотонный возрастающий характер. Полученные двумя методами измерений значения коэффициента затухания в точках перекрытия диапазонов измерений совпадают в пределах погрешности измерений.

Таблица 2

Результаты измерений коэффициента затухания продольных УЗ-волн эхо-импульсным (ЭИ) и резонансным (Р)

| Мера | Частота, МГц | $\alpha_L$ , дБ/м | $S_0$ | $\Theta_0$ | Метод |
|------|--------------|-------------------|-------|------------|-------|
| № 1  | 1,070        | 0,20              | 0,064 | 0,064      | Р     |
|      | 1,914        | 0,33              | 0,061 | 0,047      |       |
|      | 2,764        | 0,73              | 0,041 | 0,027      |       |
|      | 5,116        | 3,50              | 0,011 | 0,009      |       |
|      | 10,011       | 11,6              | 0,009 | 0,005      |       |
|      | 20,231       | 79,9              | 0,010 | 0,002      | ЭИ    |
|      | 20,0         | 80                | 0,012 | 0,022      |       |
|      | 30,0         | 145               | 0,010 | 0,012      |       |
|      | 40,0         | 282               | 0,011 | 0,006      |       |
|      | 50,0         | 460               | 0,011 | 0,004      |       |
| № 4  | 1,241        | 1,89              | 0,011 | 0,010      | Р     |
|      | 2,480        | 4,60              | 0,011 | 0,006      |       |
|      | 4,950        | 106               | 0,009 | 0,002      |       |
|      | 5,0          | 103               | 0,010 | 0,010      | ЭИ    |
|      | 7,5          | 440               | 0,009 | 0,002      |       |
|      | 8,0          | 520               | 0,010 | 0,004      |       |
| № 6  | 2,520        | 0,28              | 0,068 | 0,049      | Р     |
|      | 3,093        | 0,74              | 0,039 | 0,022      |       |
|      | 5,040        | 3,10              | 0,010 | 0,008      |       |
|      | 10,062       | 94                | 0,011 | 0,002      |       |
|      | 10,0         | 98                | 0,010 | 0,011      | ЭИ    |
|      | 15,0         | 267               | 0,011 | 0,004      |       |
|      | 18,0         | 460               | 0,011 | 0,002      |       |
|      | 19,0         | 510               | 0,011 | 0,004      |       |
| № 8  | 1,711        | 0,30              | 0,033 | 0,059      | Р     |
|      | 2,30         | 0,48              | 0,042 | 0,046      |       |
|      | 3,756        | 0,75              | 0,027 | 0,042      |       |
|      | 10,930       | 5,30              | 0,039 | 0,016      |       |
|      | 20,494       | 12,4              | 0,024 | 0,013      |       |
|      | 30,057       | 20,8              | 0,019 | 0,011      |       |
|      | 50,209       | 43,4              | 0,012 | 0,009      |       |
|      |              |                   |       |            |       |

**Метрологические характеристики ГЭТ 189—2014.** Метрологические характеристики ГПЭ приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Метрологические характеристики эталона

| Характеристика                                          | Скорость распространения УЗ-волн, м/с |                     |                     | Коэффициент затухания, дБ/м, для продольных УЗ-волн |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
|                                                         | продольных                            | сдвиговых           | поверхностных       |                                                     |
| Диапазон воспроизведения единицы                        | 5000—6500                             | 2000—4000           | 2000—3500           | 0,2—500                                             |
| Рабочий диапазон частот, МГц                            | 0,5—25,0                              | 0,5—10              | 0,3—30              | 1,0—50                                              |
| СКО результата измерений (при $n = 11 \dots 18$ )       | $4,6 \cdot 10^{-7}/d$                 | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | $3,0 \cdot 10^{-5}$ | $0,047/\alpha_L^{1/4}$                              |
| Границы НСП результата измерений ( $P = 0,99$ )         | $1,4 \cdot 10^{-4}$                   | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | $6,0 \cdot 10^{-5}$ | 0,01—0,07*                                          |
| Стандартная неопределённость:<br>по типу А<br>по типу В | $2,3 \cdot 10^{-5}$                   | $5,0 \cdot 10^{-4}$ | $3,0 \cdot 10^{-5}$ | 0,01—0,07*                                          |
|                                                         | $5,6 \cdot 10^{-5}$                   | $8,3 \cdot 10^{-4}$ | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,004—0,03*                                         |
| Суммарная стандартная неопределённость                  | $6 \cdot 10^{-5}$                     | $9,6 \cdot 10^{-4}$ | $3,9 \cdot 10^{-5}$ | 0,01—0,076*                                         |
| Расширенная неопределённость ( $k = 2$ )                | $1,2 \cdot 10^{-4}$                   | $1,9 \cdot 10^{-3}$ | $7,8 \cdot 10^{-5}$ | 0,02—0,15*                                          |

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

Основными источниками НСП измерений скорости распространения УЗ-волн являются: для продольных и сдвиговых — временная привязка УЗ-импульсов, дисперсия скорости в исходной мере, неоднородность материала меры; для поверхностных — временная привязка УЗ-импульсов, неточность определения акустической базы, неоднородность материала меры. Неисключённые систематические погрешности измерений коэффициента затухания УЗ-волн обусловлены погрешностями определения дифракционных поправок; несоосностью электродов; нестабильностью температуры меры; шероховатостью поверхности меры; неоднородностью материала меры; неточностью измерения ослабления (отношения амплитуд) УЗ-импульсов и скорости продольных УЗ-волн.

Эталон возглавляет государственную поверочную схему для средств измерений скоростей распространения УЗ-волн, регламентированную национальным стандартом [17]. Разработана новая единая государственная поверочная схема, определяющая порядок передачи единиц скоростей распространения и коэффициента затухания УЗ-волн в твёрдых средах. Передача единиц скоростей распространения УЗ-волн от ГПЭ рабочим эталонам осуществляется методом сличения при помощи меры с использованием комплекта исходных мер скорости, входящего в состав первичного эталона, и методом прямых измерений. Передача единицы коэффициента затухания продольных УЗ-волн от ГПЭ рабочим эталонам осуществляется методом сличения с помощью меры с использованием комплекта исходных мер коэффициента затухания, входящего в состав первичного эталона. Измере-

ния скорости распространения и коэффициента затухания УЗ-волн при передаче единиц проводятся с учётом возможной акустической неоднородности меры: в центре меры и в четырёх точках, расположенных через 90° на расстоянии  $(10,0 \pm 0,5)$  мм от оси. За действительное значение коэффициента затухания принимается среднее значение, полученное по всем точкам.

Дальнейшее совершенствование ГПЭ предполагает исследование и использование новых высокоточных методик измерений скорости УЗ-волн; расширение частотного диапазона измерений для продольных УЗ-волн до 100 МГц; разработку методов и средств прецизионных измерений коэффициентов затухания сдвиговых и поверхностных УЗ-волн; разработку комплектов эталонных мер скорости и коэффициента затухания УЗ-волн в твёрдых средах для передачи единиц рабочим эталонам и средствам измерений.

## Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Алешин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х., Воцанов А. К., Ермолов И. Н., Гурвич А. К. Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989.
5. ГОСТ 31244—2004. Контроль неразрушающий. Оценка физико-механических характеристик материала элементов технических систем акустическим методом. Общие требования.
6. Ключев В. В., Ковалев А. В., Самокрутов А. А. Рынок средств УЗК — современное состояние // В мире неразрушающего контроля. 2001. № 1 (11). С. 40—45.
7. Ланге Ю. В. Ультразвуковая дефектоскопия вчера, сегодня, завтра // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 4 (18). С. 14—19.
8. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль металлов. Справочник / Пер. с нем. Под ред. Волченко В. Н. М.: Металлургия, 1991.

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

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

11. **Кондратьев А. И.** Прецизионные измерения скорости и затухания ультразвука в твёрдых телах // *Акустический журнал*. 1990. Т. 36. № 3. С. 470—476.

12. **Кондратьев А. И.** Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твёрдых сред. Хабаровск. Изд-во ДВГУПС, 2006.

13. **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.

14. **Гусаков С. А., Кондратьев А. И.** Образцовая установка для комплексных измерений акустических параметров материалов // *Измерительная техника*. 1989. № 7. С. 50—52.

15. **Луговой В. А., Троценко В. П.** Высокостабильный ёмкостной преобразователь ультразвуковых сигналов // *ПТЭ*. 1986. № 3. С. 194—195.

16. **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.

17. **ГОСТ Р 8.756—2014.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твёрдых средах.

Дата принятия 18.11.2015 г.

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

538.945:621.375.67

# Квантовый интерферометр на сжатых состояниях с эффектом параметрической модуляции кинетической индуктивности

Л. Н. ЖЕРИХИНА<sup>1</sup>, Г. Н. ИЗМАЙЛОВ<sup>2</sup>, А. М. ЦХОВРЕБОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (Национальный технический университет), Москва, Россия, e-mail: izmailov@mai.ru

Обсуждается принцип сжатия квантовых флуктуаций при параметрическом воздействии на колебательную систему, используемую в сверхвысокочувствительных измерениях. Предложена схема эксперимента, в которой реализуется режим квантового сжатия в безгистерезисном режиме сквида с радиочастотной параметрической накачкой и специальным тестирующим сигналом сверхвысокочастотного диапазона.

**Ключевые слова:** высокочувствительные измерения, квантовые флуктуации, квантовое сжатие, параметрическая модуляция, кинетическая индуктивность.

*The principles of quantum fluctuation compression with parametric effects on the oscillatory system used in ultrahigh measurements are discussed. The scheme of experiment where mode of quantum compression is realized in the hysteresis-free regime with RF SQUID parametric pumping and special microwave test signal is presented.*

**Key words:** high-sensitivity measurements, quantum fluctuations, quantum compression, parametric modulation, kinetic inductance.

Возможность измерения физических величин с точностью, превышающей квантовые ограничения, налагаемые соотношением неопределённости Гейзенберга, стала предметом многих исследований по квантовой метрологии. Можно выделить основные концептуальные направления решения этой сложной проблемы.

Во-первых, по аналогии с терминологией медицинской диагностики — неинвазивные (слабые) измерения, в ходе проведения которых квантовое состояние системы как та-

ковое остается неизменным, условием чего оказывается сведение всех производимых над системой действий к «умножению» её вектора состояния на соответствующую унитарную матрицу преобразования. При этом результирующее преобразование должно быть обратимым и его матрица должна допускать обратное преобразование [1, 2].

Во-вторых, квантовые неразрушающие измерения (quantum nondemolition measurements), при выполнении которых на систему оказывается настолько слабое воздействие, что она