

УДК 006.91 : 534-14

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗВУКОПРОЗРАЧНЫХ
МЕТАЛИЗИРОВАННЫХ ПЛЁНОК ДЛЯ КАЛИБРОВКИ
ГИДРОФОНОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В СВОБОДНОМ ПОЛЕ****А.М. Еняков, С.И. Кузнецов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
enyakov@vniiftri.ru,
sergantex@vniiftri.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности применения плёнки из полиэтилентерефталата толщиной в несколько микрометров для отслеживания колебательного смещения в ультразвуковой волне в диапазоне частот от 1 до 20 МГц с дальнейшим пересчётом колебательной скорости в акустическое давление при калибровке гидрофонов. Одна из сторон плёнки покрыта тонким слоем металла для улучшения отражения лазерного луча интерферометрического измерителя амплитуд смещения. Показано, что адекватность колебаний плёнки и частиц воды в падающей ультразвуковой волне зависит от акустического сопротивления и толщины плёнки. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны для введения поправок в результаты измерения колебательной скорости плёнки различной толщины и оценены неопределённости этих поправок.

Ключевые слова: калибровка гидрофонов, колебательная скорость, лазерный интерферометр, плёнка ПЭТ, ультразвук.

**FEATURES OF THE APPLICATION
OF SOUND-TRANSPARENT METALLIZED FOILS
FOR THE CALIBRATION OF HYDROPHONES USING
OPTICAL INTERFEROMETRY IN FREE FIELD****A.M. Enyakov, S.I. Kuznetsov**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
enyakov@vniiftri.ru,
sergantex@vniiftri.ru

Annotation. The features of the use of a polyethylene terephthalate foil with a thickness of several micrometers for tracking the vibrational displacement in an ultrasonic wave in the frequency range from 1 to 20 MHz with further conversion of the vibrational velocity to the acoustic pressure during the calibration of hydrophones are considered. One side of the foil is coated with a thin layer of metal to improve the reflection of the laser beam of the interferometric displacement amplitude meter. It is shown that the adequacy of the vibrations of the foil and water particles in the incident ultrasonic wave depends on the acoustic resistance and the thickness of the foil. The frequency dependences of the

ultrasonic wave transmission coefficient for introducing corrections to the results of measuring the vibrational velocity of a foil of different thickness are calculated and the uncertainties of these corrections are estimated.

Key words: hydrophone calibration, vibrational velocity, laser interferometer, PET film, ultrasound.

Введение

Методы калибровки гидрофонов постоянно совершенствуются, охватывая всё больший диапазон частот. Активное внедрение ультразвуковых технологий для диагностики и лечения в здравоохранении определяет необходимость измерения параметров ультразвуковых полей в диапазоне частот от 0,1 до 100 МГц. Такие измерения выполняют с помощью высокочастотных гидрофонов, и поэтому проблемы их калибровки на мегагерцовых частотах весьма актуальны. Международный [1] и гармонизированный с ним национальный стандарт [2] рекомендуют различные методы калибровки гидрофонов в зависимости от их рабочего диапазона частот. Эти методы с соответствующими частотными диапазонами и типичными значениями расширенной неопределённости результатов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень типичных значений неопределённости результатов калибровок методами, установленными в [1] и [2], в различных диапазонах ультразвуковых частот

Метод калибровки	Диапазон частот, МГц	Неопределённость, %
Метод взаимности с двумя преобразователями	от 1 до 2	6
	до 10	10
	до 15	16
Метод взаимности с тремя преобразователями	от 0,05 до 0,1	5
	до 0,5	6
	до 1	10
Метод плоского сканирования в свободном поле	от 0,5 до 10	6
	до 15	18
Метод оптической интерферометрии в свободном поле	от 0,2 до 1	7
	до 10	7
	до 20	8
Метод сравнения с эталонным гидрофоном	от 0,05 до 0,2	9
	до 1	8
	до 10	7
	до 20	11

Как видно из таблицы 1, наиболее широко применяемая в традиционной гидроакустике калибровка гидрофонов методом взаимности с тремя преобразователями не подходит для мегагерцового диапазона частот, а методы взаимности с двумя преобразователями и плоского сканирования ограничены сверху частотой 15 МГц и высокими значениями неопределённости. Не подходит и метод сравнения из-за отсутствия у нас в стране эталонных гидрофонов. Представленные в таблице данные, касающиеся метода оптической интерферометрии, уже устарели: первичные эталоны ведущих национальных институтов расширили частотные диапазоны калибровки гидрофонов до 40–60 МГц. Вне сомнения, что этот метод является наиболее перспективным для применения на мегагерцовых частотах. Его преимущества позволили рекомендовать его в качестве стандартного в диапазоне частот от 1 до 40 МГц [1, 2]. В связи с началом работ по созданию во ФГУП «ВНИИФТРИ» первичного эталона единицы звукового давления в воде для диапазона частот от 1 до 20 МГц целесообразно рассмотреть основные проблемы реализации методов оптической интерферометрии для калибровки гидрофонов на этих частотах. Одной из этих проблем, связанной с воспроизведением единицы акустического давления, и посвящена настоящая работа.

Методы оптической интерферометрии предполагают измерение акустического смещения в акустическом поле, генерируемом преобразователем. Такие смещения измеряют с помощью тонкой полимерной мембраны или плёнки, установленной в акустическом поле перпендикулярно направлению распространения акустической волны и колеблющейся совместно с колебаниями частиц среды распространения. Для обеспечения качественного отражения лазерного луча поверхность плёнки (обычно толщиной в несколько микрон) металлизирована. Смещение плёнки можно измерить методом оптической интерферометрии. В дальнем поле преобразователя, то есть в условиях плоской волны, это смещение связано с акустическим давлением простым соотношением

$$p = \rho c \omega \xi = \rho c v, \quad (1)$$

где p — амплитуда акустического давления; ρ — плотность среды распространения; c — скорость звука в ней; ω — круговая частота; ξ — амплитуда акустического смещения без учёта разности фаз между давлением и смещением; v — амплитуда колебательной скорости частиц среды.

Заменив мембрану калибруемым гидрофоном, установив его чувствительным элементом в место расположения лазерного пятна на плёнке так, чтобы ось чувствительности гидрофона совпадала с осью ультразвукового поля, и измерив амплитудное значение напряжения на его выходе, соответствующее полученной из (1) амплитуде акустического давления, можно определить чувствительность гидрофона на требуемой частоте.

Постановка задачи

Известны два способа реализации этого метода, показанные на рис. 1 и 2. В одном из них мембрана установлена на рамке в измерительном баке с водой перпендикулярно оси ультразвукового пучка излучателя, тоже находящегося в воде и облучающего плёнку. Противоположная сторона плёнки направлена в сторону интерферометра и покрыта тонким (20–50 нм) слоем металла (золото, алюминий и др.) для улучшения отражения зондирующего лазерного луча. Считается, что ультразвуковая волна проходит сквозь плёнку практически без отражения и поглощения [3]. Однако в этой конфигурации имеет место оптико-акустическое взаимодействие, связанное с периодическими изменениями показателя преломления воды в звуковом поле и влияющее на достоверность измерения смещения (или колебательной скорости) мембраны [4]. Такую конфигурацию применяют исследователи из Национальной физической лаборатории Великобритании, в том числе и в первичном эталоне единицы звукового давления в воде [5, 6].

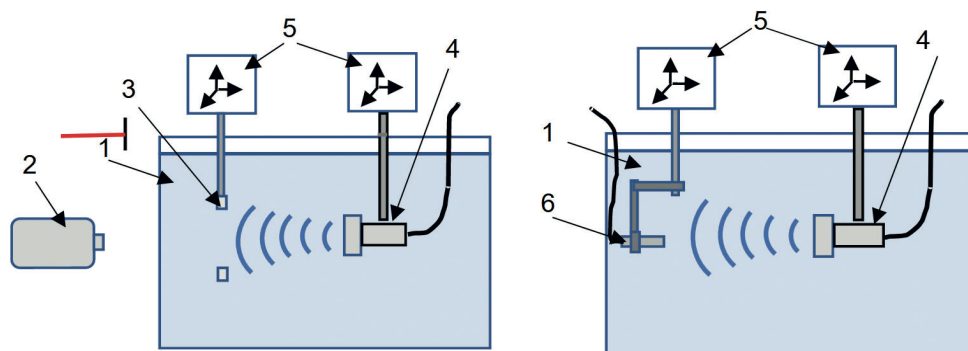


Рис. 1. Калибровка гидрофона методом оптической интерферометрии при расположении мембраны в воде: слева — измерение колебательной скорости частиц воды; справа — измерение акустического давления калибруемым гидрофоном;
 1 — измерительный бак с водой; 2 — лазерный интерферометр (виброметр);
 3 — полимерная мембрана; 4 — ультразвуковой излучатель;
 5 — трёхкоординатные позиционеры; 6 — калибруемый гидрофон

Во втором способе мембрану в рамке размещают на поверхности воды металлизированной стороной вверх для приёма зондирующего лазерного луча, а излучатель устанавливают в воде снизу так, чтобы направленный от него ультразвуковой пучок был направлен снизу вверх перпендикулярно мембране [7, 8]. После измерения колебательной скорости плёнки её извлекают из бака, на её место устанавливают калибруемый гидрофон и повышают уровень воды в баке так, чтобы на выходе гидрофона можно было разделить прямой сигнал от излучателя и отражённый от поверхности воды.

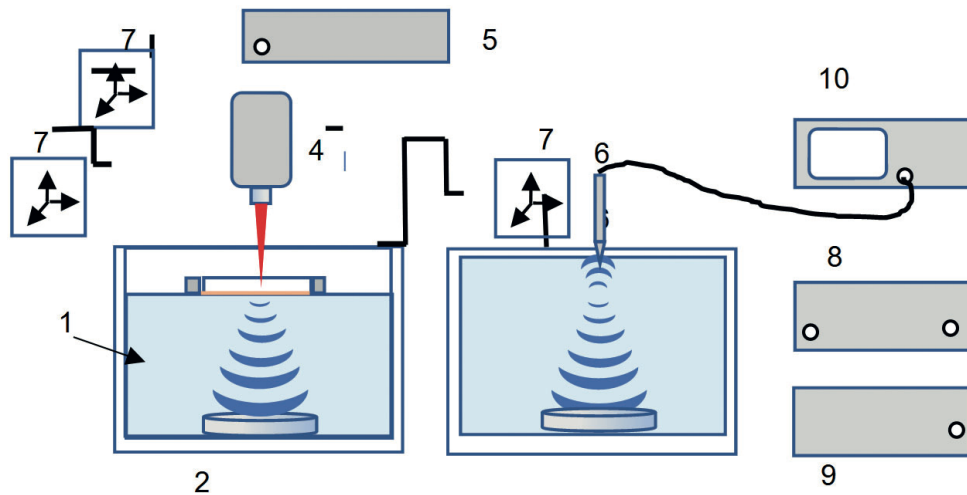


Рис. 2. Калибровка гидрофона методом оптической интерферометрии при расположении мембраны на поверхности воды: слева — измерение колебательной скорости частиц воды, справа — измерение акустического давления калибруемым гидрофоном; 1 — измерительный бак с водой; 2 — фокусируемый ультразвуковой излучатель; 3 — полимерная мембрана; 4 — оптическая головка лазерного виброметра; 5 — контроллер лазерного виброметра; 6 — калибруемый гидрофон; 7 — трёхкоординатные позиционеры

В качестве наиболее подходящего для мембраны материала повсеместно используется полиэтилентерефталат (в зарубежных публикациях — майлар, в отечественных — лавсан), плёнки из которого отличаются достаточной упругостью [9], далее по тексту — плёнка ПЭТ. Какой бы вариант построения интерферометрической измерительной системы ни рассматривался, наиболее важным для неё остаётся вопрос адекватности отслеживания перемещения (колебания) металлизированной стороны плёнки ПЭТ колебательным смещениям частиц воды в звуковой волне, падающей на мембрану. В многочисленных публикациях, посвящённых реализации метода оптической интерферометрии, этой проблеме уделяется относительно мало внимания со скудными ссылками на то, что применение плёнки ПЭТ с удельным акустическим сопротивлением, близким к сопротивлению воды, не оказывает значимого влияния на структуру воздействующего на него ультразвукового поля в диапазоне частот от сотен килогерц до нескольких мегагерц [10–12]. Однако такие утверждения требуют уточнений. Нет и достаточных обоснований для выбора толщины плёнки ПЭТ: её толщина может составлять 23 мкм при измерениях на частотах от нескольких сотен килогерц до 1 МГц [11]; 15 мкм (от 100 до 500 кГц) [12]; 5 мкм (от 1 до 40 МГц) [13]; 3,5 мкм (от 1 до 60 МГц) [14]; 2 мкм (от 1 до 50 МГц [15] или 70 МГц [7]); 0,9 мкм

(от 5 до 100 МГц) [16] с разбросом максимальных значений волновой толщины $k_1 d_1$ плёнки ($k_1 = 2\pi f_v / c_{зв}$ — волновое число; f_v — верхняя частота калибровки гидрофона; $c_{зв} = 2100$ м/с — скорость звука в плёнке; d_1 — толщина плёнки от 0,022 (для [9]) до 0,63 (для [14]). Волновая толщина плёнки определяет влияние интерференционных эффектов при прохождении звуковой волны через плёнку, а значит, и частотную зависимость коэффициента прохождения её колебательной скорости, которую необходимо учесть как отклонение колебательной скорости на внешней (противоположной к источнику звука) стороне плёнки ПЭТ от колебательной скорости частиц воды в её отсутствие. В результаты калибровки гидрофона следует ввести поправки, связанные со свойствами плёнки. Их обоснование и является целью настоящих исследований.

Определение параметров плёнки ПЭТ

При рассмотрении механизма прохождения плоской звуковой волны через слоистые среды в двух конфигурациях расположения мембраны следует рассмотреть два варианта:

- 1) прохождение звуковой волны из воды (среда 0) через полимерную плёнку (среда 1) толщиной d_1 , слой её металлизации (среда 2) толщиной d_2 в воду (среда 0), реализуемое при калибровке гидрофонов в [3, 5, 6, 10–12, 14];
- 2) прохождение звуковой волны из воды (среда 0) через полимерную плёнку (среда 1) толщиной d_1 , слой её металлизации (среда 2) толщиной d_2 в воздух (среда 3), применяемое в [7, 8, 13, 15, 16].

В обоих вариантах необходимо учитывать многократные отражения звуковой волны от поверхностей раздела каждой из сред, характеризующихся удельными акустическими сопротивлениями $R_0 = \rho_0 c_0$, $R_1 = \rho_1 c_1$, $R_2 = \rho_2 c_2$, $R_3 = \rho_3 c_3$. Учитывая, что толщина полимерной плёнки составляет несколько микрометров, а её металлизированного слоя — на 2 порядка меньше, влиянием среды 2 на прохождение ультразвуковой волны можно пренебречь. И тогда влияние мембраны определяется двумя известными [17] условиями прохождения ультразвуковой волны через тонкий слой плёнки ПЭТ: из воды через плёнку в воду и из воды через плёнку в воздух.

Для первой конфигурации при нормальном падении ультразвуковой волны коэффициенты её отражения r_p и прохождения t_p по давлению можно выразить как [17]

$$r_p = \frac{\frac{R_0}{R_1} - \frac{R_1}{R_0}}{\sqrt{\left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_1}{R_0}\right)^2 + 4\text{ctg}^2 k_1 d_1}}; \quad t_p = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_1}{R_0}\right)^2 \left(\frac{\sin k_1 d_1}{2}\right)^2 + \cos^2 k_1 d_1}}, \quad (2)$$

где $k_1 = \frac{2\pi f}{c_1}$ — волновое число; f — частота ультразвуковой волны; c_1 —

скорость звука в плёнке; d_1 — толщина плёнки. Эти выражения полезны тем, что значения r_p и t_p можно получить прямыми измерениями, как это показано на рис. 3 и 4. Коэффициент отражения r_p от плёнки в воде можно измерить с помощью гидрофона методом сравнения амплитуд сигналов, отражённых от плёнки и от отражателя с известным $r_{p-отр}$ (например, пластины из нержавеющей стали или латуни толщиной более 20 мм), а коэффициент поглощения t_p плёнки в воде — сравнением амплитуд сигналов, принимаемых гидрофоном, находящимся за плёнкой и в её отсутствие.

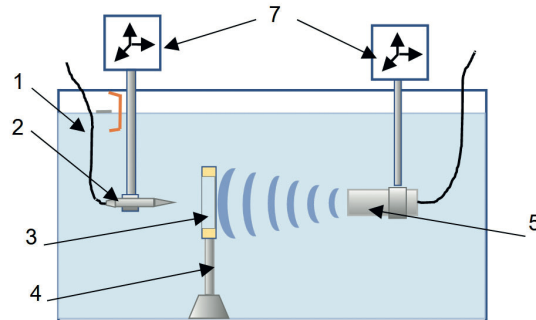


Рис. 3. Измерение коэффициента прохождения ультразвуковой волны (по давлению):

- 1 — измерительный бак с водой; 2 — гидрофон; 3 — мембрана из металлизированной плёнки ПЭТ; 4 — штатив с рамкой для мембраны; 5 — ультразвуковой излучатель; 6 — трёхкоординатные позиционеры

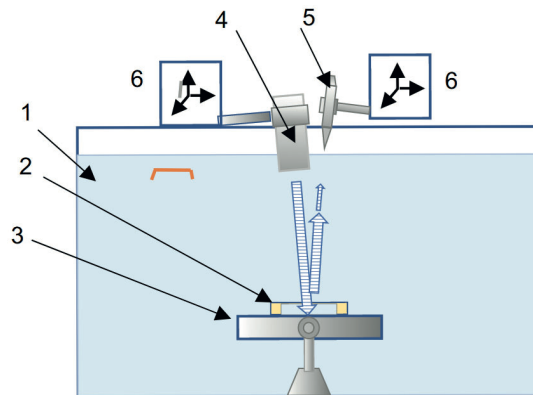


Рис. 4. Измерение коэффициента отражения ультразвуковой волны (по давлению):

- 1 — измерительный бак с водой; 2 — мембрана из металлизированной плёнки ПЭТ; 3 — отражатель с известным коэффициентом отражения; 4 — ультразвуковой излучатель; 5 — гидрофон; 6 — трёхкоординатные позиционеры

Отражённый от плёнки сигнал будет существенно меньше сигнала, отражённого от металлического отражателя (рис. 5), и погрешность измерений коэффициента отражения от плёнки будет зависеть от динамического диапазона используемого осциллографа. Для её снижения следует использовать калиброванный аттенуатор, и тогда при измерении отражённого от плёнки сигнала можно повысить напряжение возбуждения ультразвукового излучателя.

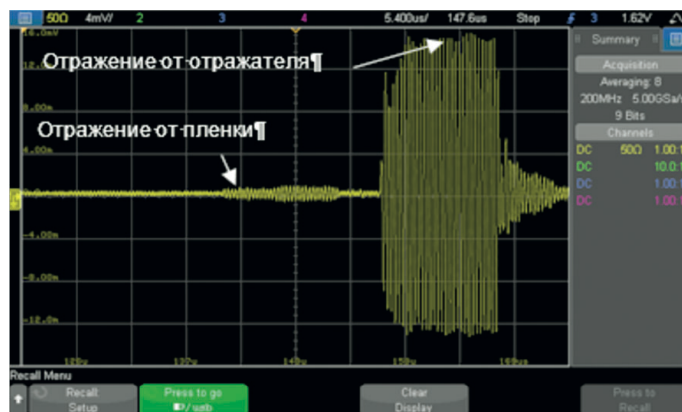


Рис. 5. Отражённые сигналы на экране осциллографа

Достоверность измеряемых коэффициентов отражения и прохождения можно проверить, используя равенство, определяемое из (2):

$$t_p = \sqrt{1 - r_p^2}. \quad (3)$$

В наших экспериментах с плёнкой толщиной 3 мкм в диапазоне частот от 1 до 20 МГц разница между измеренными значениями t_p и значениями, вычисленными по измеренным значениям r_p в соответствии с (3), лежала в пределах от 0,3 до 1,7 %, и её можно оценивать как погрешность измерения этих коэффициентов.

Следует отметить, что измерения r_p и t_p актуальны в каждом случае применения мембран из плёнки ПЭТ для определения скорости звука в ней по выражениям (2), так как скорость звука в плёнке может варьироваться в зависимости от процесса её изготовления и толщины материала. В сопроводительной документации на приобретаемую плёнку эта характеристика, как правило, отсутствует. Пользователи плёнки в указанных выше публикациях обычно не приводят конкретных данных по скорости звука используемой ими плёнки, а если такие данные и можно найти, то они противоречивы (например, в [5] $\rho_1 c_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ кг м}^2 \text{ с}^{-1}$, а в [10] $\rho_1 c_1 = 1,83 \cdot 10^6 \text{ кг м}^2 \text{ с}^{-1}$).

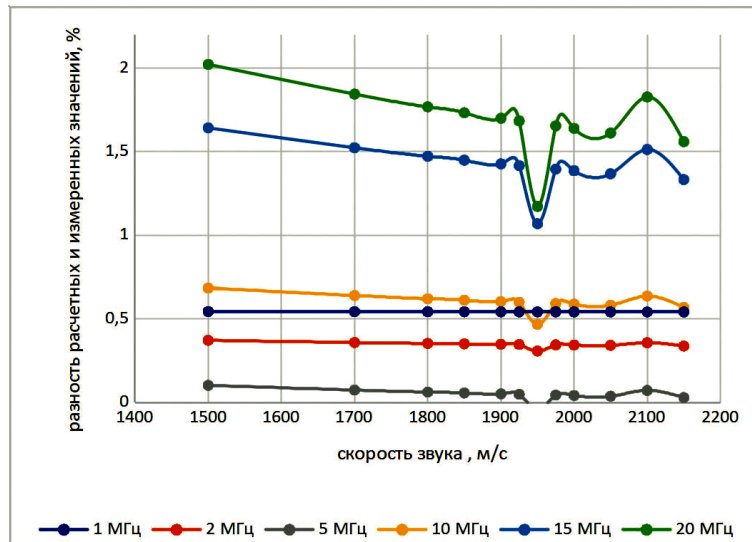


Рис. 6. Разность расчётных и измеренных значений коэффициента прохождения звукового давления через плёнку толщиной 3 мкм в зависимости от предполагаемой скорости звука в ней и частоты измерения

Наши измерения коэффициентов отражения и прохождения ультразвуковой волны через плёнку ПЭТ толщиной 3 мкм с односторонним нанесением слоя алюминия толщиной 70 нм в диапазоне частот от 1 до 20 МГц позволили определить скорость звука в ней, которая составила (1950 ± 10) м/с и была использована в дальнейших исследованиях. Эта скорость была получена путём подстановки ожидаемых значений скорости звука плёнки в выражение (2) для t_p и нахождения минимальной разности результатов прямых и вычисленных измерений t_p . Этот минимум подтверждён на всех частотах измерения t_p и наиболее очевиден в верхнем диапазоне частот (рис. 6).

Прохождение ультразвуковой волны из воды через плёнку в воздух

Вторая конфигурация применения мембраны связана с решением задачи о проникновении ультразвуковой волны из воды (среда 0) через плёнку (среда 1) и тончайший металлизированный слой (среда 2) в воздух (среда 3). Её решение необходимо для определения аналитической зависимости коэффициента прохождения (по колебательной скорости) от параметров плёнки и частоты ультразвуковой волны для введения соответствующих поправок в результаты интерферометрических измерений колебательной скорости на выходной стороне плёнки и определения тем самым действительных значений колебательной скорости частиц воды в волне, падающей на плёнку.

Как и в рассмотренном выше случае, алгоритм расчёта частотной зависимости коэффициента прохождения колебательной скорости через плёнку толщиной $d_1 = 1\text{--}12$ мкм предполагает, что потери акустической энергии при её прохождении (и отражении) через слой металла (например, алюминия) толщиной $d_2 = 20\text{--}70$ нм пренебрежимо малы, так как $k_1 d_1 > 200 k_2 d_2$. Это подтверждается и нашими экспериментами при измерениях коэффициента прохождения ультразвуковой волны из воды через плёнку в воду (рис. 3), результаты которых при смене ориентации плёнки на противоположную (то есть металлизированная сторона плёнки направлена к излучателю или от него) отличаются в сотых долях процента. В этом случае коэффициент звукоизоляции η как отношение энергии падающей на плёнку ультразвуковой волны к энергии, прошедшей сквозь неё в воздух при нормальном падении, выразится как [14]

$$\eta = \frac{\left(\frac{R_3}{R_0} + 1\right)^2 - \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1\right)\left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1\right) \sin^2 k_1 d_1}{4 \frac{R_3}{R_0}}. \quad (4)$$

Величина $1/\eta$ соответствует коэффициенту проникновения звуковой энергии в воздух, а квадратный корень этой величины, умноженной на отношение R_0/R_3 , равен коэффициенту прохождения T_v — отношению колебательных скоростей в ультразвуковой волне, прошедшей через плёнку в воздух и падающей на неё из воды. Таким образом, коэффициент прохождения ультразвуковой волны из воды через плёнку в воздух (по колебательной скорости) можно представить как

$$T_v = 2 \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{R_3}{R_0} + 1\right)^2 - \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1\right)\left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1\right) \sin^2 k_1 d_1}}. \quad (5)$$

Заметим, что колебательная скорость звуковой волны при переходе через поверхность вода — воздух практически удваивается, так как в этом случае

$$T_{\text{вода-возд}} = \frac{v_{\text{возд}}}{v_{\text{вода}}} = \frac{2R_{\text{вода}}}{R_{\text{вода}} + R_{\text{возд}}},$$

и учитывая, что $R_{\text{вода}} = 1,485 \cdot 10^6$ кг м⁻² с⁻¹ и $R_{\text{возд}} = 4,2 \cdot 10^2$ кг м⁻² с⁻¹, то $T_{\text{вода-возд}} = 1,9994$. Поэтому потери Δ_v колебательной скорости при переходе звуковой волны из воды через плёнку в воздух (в процентах) можно представить как

$$\Delta_v = 50(2 - T_v). \quad (6)$$

Из (4) видно, что коэффициент звукоизоляции плёнки, а значит и коэффициент проникновения звуковой энергии через плёнку, а также колебательная скорость частиц на границе раздела плёнка — воздух зависят от соотношения удельных акустических сопротивлений соприкасающихся сред распространения. При этом, если значения удельного акустического сопротивления воды и воздуха хорошо известны, то сведения об акустических параметрах (скорость звука, плотность) плёнки ПЭТ противоречивы. Вызывает вопросы и точность определения толщины плёнки, особенно для её минимально допустимых размеров. В соответствии с [9] минимальная толщина плёнки ПЭТ отечественного производства — 3 мкм с допустимыми отклонениями 0,3 мкм (высшего сорта) и 0,5 мкм (1-го сорта). Измерить действительную толщину плёнки по ГОСТ 17035 [18] не удаётся, так как этот стандарт ссылается на отменённые 30 лет назад нормативные документы [19] и рекомендуемое в них оборудование снято с производства 30 лет назад. Современные импортные приборы для измерения толщины плёнки ПЭТ интерферометрическими методами практически недоступны.

Однако точное знание толщины мембраны необходимо для введения поправок в частотную зависимость коэффициента прохождения T_v звуковой волны через плёнку. Эта зависимость проиллюстрирована на рис. 7 графиком, горизонтальная ось которого представлена значениями волновой толщины плёнки $k_1 d_1$ в диапазоне от 0,009 (для плёнки толщиной 3 мкм на частоте 1 МГц) до 0,717 (для плёнки толщиной 12 мкм на частоте 20 МГц). При расчётах T_v скорость звука в плёнке принята равной 1950 м/с по приведённым выше результатам измерений, а её плотность $\rho = 1430 \text{ кг/м}^3$ соответствует проверенным литературным данным. Сплошная кривая на рис. 7 представляет зависимость T_v от $k_1 d_1$, а пунктирная — долю потерь Δv колебательной скорости при прохождении звуковой волны через плёнку в воздух.

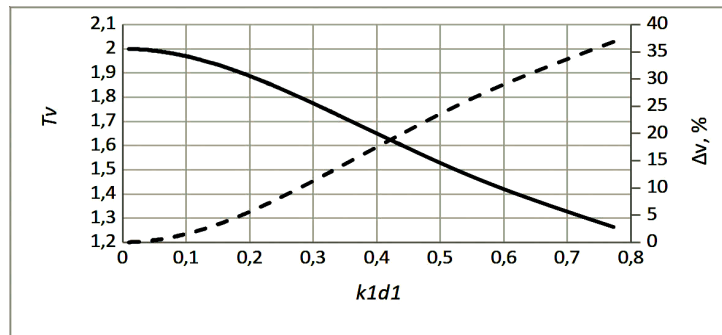


Рис. 7. Зависимость коэффициента прохождения T_v колебательной скорости ультразвуковой волны (сплошная кривая) и её потерь Δv (пунктир) через плёнку из воды в воздух от волновой толщины плёнки

Из графиков, представленных на рис. 7, видно, что для $k_1 d_1 < 0,1$ (например, для плёнки 3 мкм на частотах 1–10 МГц или 5 мкм на частотах 1–5 МГц) коэффициент прохождения колебательной скорости из воды в воздух превышает 1,975, а её потери менее 1,3 %, что даёт возможность не вводить поправки в результаты измерений колебательной скорости ультразвукового поля, так как введение поправок сопровождается неопределённостями, соизмеримыми в этом случае с самими поправками.

Проиллюстрируем представленные на рис. 7 аналитические зависимости расчётными значениями коэффициента прохождения звуковой волны из воды через плёнку в воздух для конкретных значений толщины плёнки, скорости звука в ней и частоты ультразвука.

На рис. 8 показаны частотные зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плёнку в воздух и её потерь (в процентах) после прохождения плёнки ПЭТ ($c_1 = 1950$ м/с) толщиной 3, 5 и 9 мкм. Из этого рисунка видно, что частота ультразвуковой волны оказывает существенное влияние на характеристики её прохождения: так, например, для плёнки толщиной 3 мкм колебательная скорость на внешней (по отношению к излучателю) стороне плёнки снижается с $T_v = 2$ (на 1 МГц) до $T_v = 1,89$ (на 20 МГц), для плёнки толщиной 9 мкм — с $T_v = 2$ (на 1 МГц) до $T_v = 1,44$ (на 20 МГц), то есть потери колебательной скорости в волне в этом частотном диапазоне возрастают до 5,3 % (для 3 мкм) и 28 %. Это означает, что при использовании плёнок любой толщины в диапазоне частот от 1 до 20 МГц необходимо вводить определяемые из (5) поправки для получения действительных значений колебательной скорости в падающей на плёнку ультразвуковой волне.

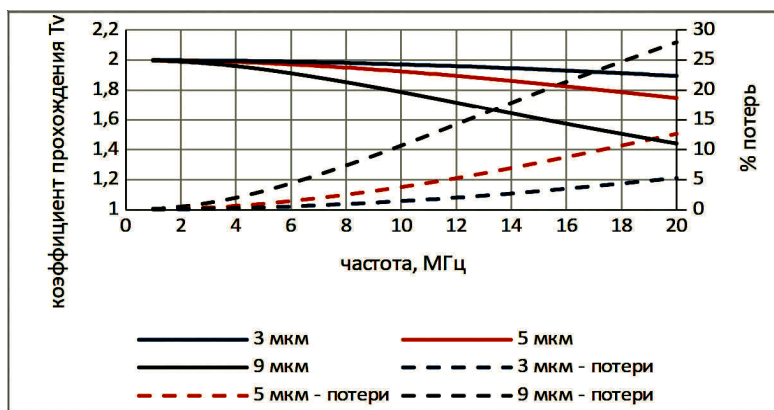


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента прохождения T_v (сплошные кривые) и потерь колебательной скорости в ультразвуковой волне через плёнку ПЭТ толщиной 3, 5 и 9 мкм (пунктирные)

На рис. 9 показаны зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плёнку в воздух от её толщины в диапазоне частот от 1 до 20 МГц, а на рис. 10 — те же зависимости, но для процента потерь колебательной скорости.

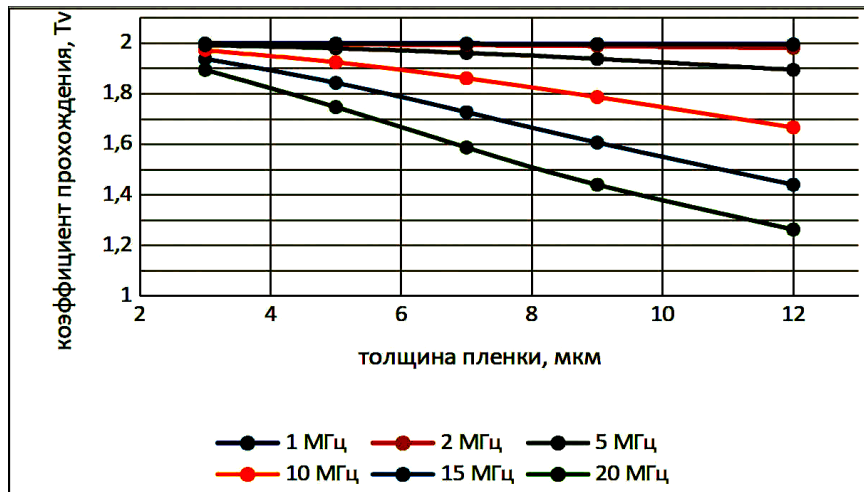


Рис. 9. Зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плёнку в воздух от её толщины в диапазоне частот от 1 до 20 МГц

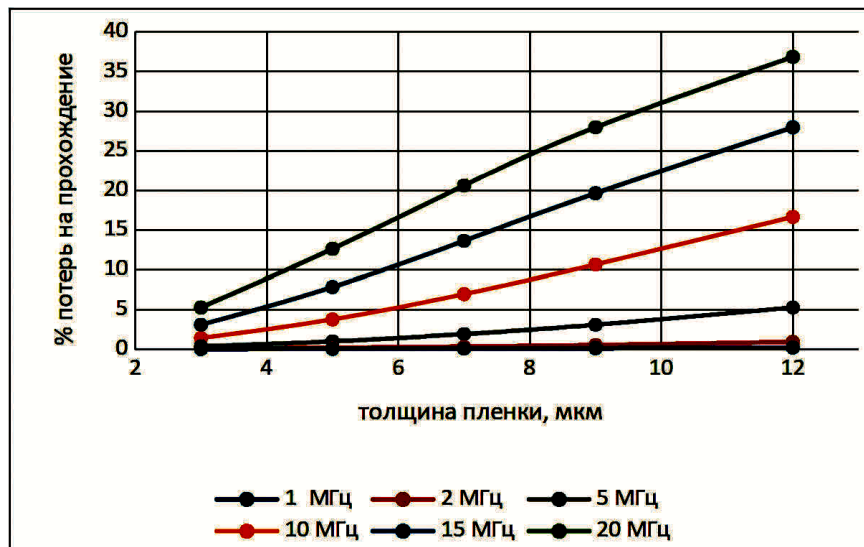


Рис. 10. Зависимости потерь при прохождении ультразвуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плёнку в воздух от её толщины в диапазоне частот от 1 до 20 МГц

Из этих рисунков видно, что результаты измерений на частотах 1–2 МГц не требуют введения поправок для плёнок ПЭТ толщиной от 3 до 12 мкм, а коррекция результатов измерений для плёнки толщиной 3 мкм в диапазоне частот до 10 МГц не превышает 1,5 %. В остальных случаях прохождение ультразвуковой волны сопровождается существенными потерями колебательной скорости, поэтому введение поправок в T_v с оценкой их неопределённостей неизбежно. Их источники связаны с погрешностью установления параметров, входящих в выражение (5). Продифференцировав это выражение по d_1 , можно оценить влияние неопределённости определения толщины плёнки на изменение коэффициента прохождения колебательной скорости через неё как

$$\frac{\partial(T_v)}{\partial d_1} = \frac{k_1 \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \sin 2k_1 d_1}{\left(\left(\frac{R_3}{R_0} + 1 \right)^2 - \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \right)^{3/2}}. \quad (7)$$

Эта зависимость проиллюстрирована на рис. 11 графически в виде кривых, показывающих неопределённость введения поправки на толщину плёнки в коэффициент прохождения T_v при изменении её толщины в диапазоне частот от 1 до 20 МГц. При этом скорость звука в плёнке принята равной 1950 м/с. Как видно из этого рисунка, неопределённость введения поправок становится значимой на частотах выше 5 МГц и может достигать 0,065 (3,2 % на 20 МГц) даже для плёнки толщиной 3 мкм. Данные рис. 10 как одного из источников суммарной неопределённости результатов калибровки гидрофона можно использовать при составлении её бюджета.

При отсутствии возможности измерения реальной толщины плёнки целесообразно оценить достоверность введения частотных поправок в коэффициент прохождения T_v , ориентируясь на данные производителя в сопроводительной документации.

В зависимости от назначения [9], плёнку ПЭТ выпускают для изготовления электроизоляционных материалов (марки К), для конденсаторов (марки КЭ), в качестве основы при получении металлизированной плёнки (марки М) и товаров культурно-бытового и хозяйственного назначения (марки О). Наиболее жёсткий допуск по толщине имеют плёнки марки КЭ. Они выпускаются высшего и первого сорта с параметрами, представленными в таблице 2. А вот плёнки марки М использовать не рекомендуется, так как они имеют допуск по толщине, равный 20 % и более.

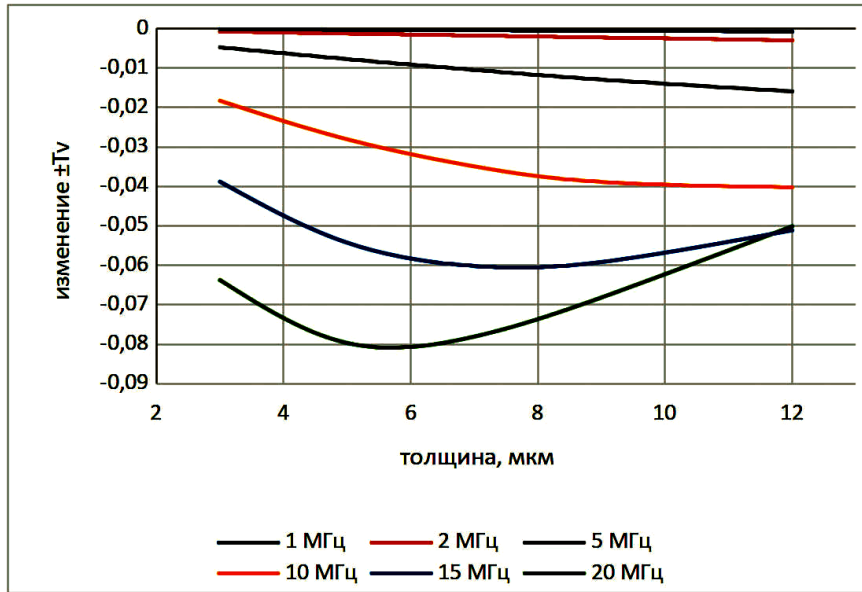


Рис. 11. Изменение коэффициента прохождения ультразвуковой волны через плёнку в воздух из-за неопределённости её толщины для различных частот и значений толщины плёнки

Таблица 2

Допуски по толщине плёнок ПЭТ марки КЭ (в мкм)

Толщина, мкм	3	4	5	6	8	10	12	15
Высший сорт	±0,3	±0,4	±0,5	±0,6	±0,8	±1,0	±1,2	±1,5
Первый сорт	±0,5	±0,5	±0,5	±1,0	±1,2	±1,5	±2,0	±2,0

В соответствии с ГОСТ 24234-80 плёнка ПЭТ высшего сорта марки КЭ толщиной от 3 до 15 мкм должна выпускаться с допуском, не превышающим ±10 % от номинальной толщины. Результаты расчёта допустимых при этом изменений ΔT_v при вариациях толщины плёнки в пределах этого допуска, хотя и зависят от частоты звуковой волны, но не превышают ±0,06 (±3 %) от расчётных значений, полученных по формуле (5), даже для частоты 20 МГц. Для плёнок малой толщины (3–5 мкм) и более низких частот (менее 10 МГц) эти изменения существенно меньше, как это и показано на рис. 12. Изменения расчётных значений потерь колебательной скорости представлены на этом рисунке пунктирными линиями.

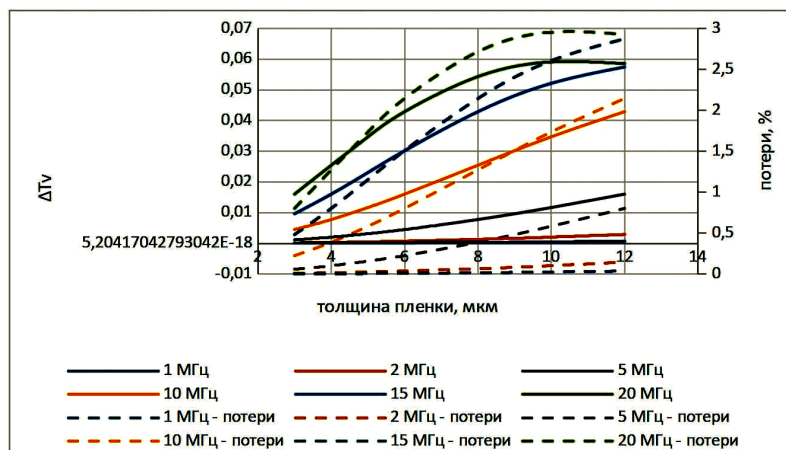


Рис. 12. Изменение коэффициента прохождения и потерь колебательной скорости в ультразвуковой волне при варьировании толщины плёнки в пределах допуска $\pm 10\%$ для различных частот и значений толщины плёнки

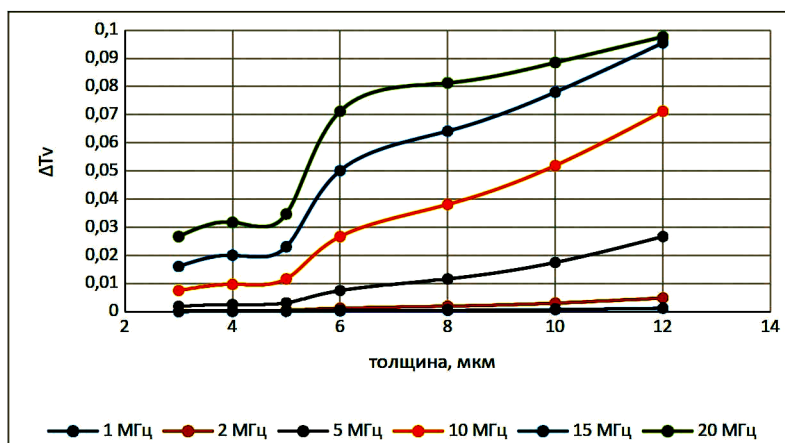


Рис. 13. Изменение коэффициента прохождения T_v колебательной скорости в ультразвуковой волне при варьировании толщины плёнки ПЭТ марки КЭ первого сорта для различных частот и значений толщины плёнки

Использование плёнок первого сорта с более расширенными вариациями воспроизводимой толщины (см. табл. 2) приводит к примерно пропорциональному росту неопределённости вычисленных значений коэффициента прохождения T_v , показанных на рис. 13, а значит, и неопределённости воспроизведения единицы акустического давления по формуле (1).

Для плёнок других марок или плёнок с неизвестным допуском по толщине введение поправок в T_v по толщине в соответствии с (2) и оценка связанного с этим источником неопределённости в соответствии с (7) обязательны.

Заключение

Плѐнки из полиэтилентерефталата широко используются для калибровки ультразвуковых гидрофонов методами оптической интерферометрии, при которых измеряют не акустическое давление, а колебательную скорость ультразвуковой волны, прошедшей через плѐнку. При этом важно, чтобы амплитуда колебаний плѐнки совпадала с амплитудой колебаний частиц воды, что определяется параметрами плѐнки — её удельным акустическим сопротивлением и толщиной, которые необходимо учитывать.

На основе упрощѐнной теории прохождения акустических плоских волн через слои разнородных материалов был разработан алгоритм расчѐта частотной зависимости коэффициента прохождения звуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плѐнку в воду или воздух. При этом предполагается, что затухание акустического пучка в слое металлизации толщиной менее 70 нм пренебрежимо мало.

Был разработан экспериментальный метод определения скорости ультразвука в плѐнке путѐм совместного измерения коэффициентов отражения от плѐнки и прохождения через неё в частотном диапазоне от 1 до 20 МГц с оценкой погрешности измеряемых величин. Полученное таким образом значение скорости звука было использовано для дальнейших расчѐтов процессов перехода ультразвуковой волны из воды через плѐнку в воздух, реализуемых для калибровки гидрофонов.

Расчѐты коэффициентов прохождения ультразвуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плѐнку в воздух позволили определить значения поправок на отклонения амплитуды колебаний плѐнки от колебательного смещения частиц ультразвуковой волны, падающей на плѐнку, и воспроизвести тем самым амплитуду акустического давления, требуемого для калибровки гидрофонов в диапазоне частот от 1 до 20 МГц. Необходимость введения поправок сопровождается неопределѐнностью их установления, источником которой является неопределѐнность определения действительной толщины плѐнки. Оценѐн размах этой определѐнности в зависимости от параметров плѐнки, декларируемых в сопроводительной документации.

Список литературы

1. IEC 62127-2:2017 Underwater acoustics. Hydrophones. Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz. — European Committee for Electrotechnical Standardization, 2007.
2. ГОСТ Р МЭК 62127-2-2009. ГСИ. Гидрофоны. Общие требования к методикам калибровки в частотном диапазоне до 40 МГц. — М.: Стандартинформ, 2011.
3. Koukoulas T. et al. Particle velocity measurements using heterodyne interferometry and Doppler shift demodulation for absolute calibration of hydrophones // Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics. — UK, Edinburgh, 2012.
4. Drain L.E., Scruby C.B. Laser Ultrasonics. — New York: Adam Hilger, 1990. — P. 223–274.
5. Bacon D.R. Primary Calibration of Ultrasonic Hydrophones Using Optical Interferometry // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. — 1988. — V. 35. — No. 2.
6. Esward T.J., Robinson S.P. Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 60 MHz // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control — 1999. — 46(3). — P. 737–744.
7. Koch Ch., Molkenstruck W. Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1–70 MHz using optical interferometry // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. — 1999. — V. 46. — No. 5. — P. 1303–1314.
8. Weber M., Wilkens V. Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of ultrasonic hydrophones with amplitude and phase // Metrologia. — 2017. — 54. — No. 4. — P. 432–444.
9. ГОСТ 24234-80. Пленка полиэтилентерефталатная. Технические условия. — М.: Издательство стандартов, 1992.
10. Bickley C.J., Zeqiri B., Robinson S.P. Providing primary standard calibrations beyond 20 MHz // Journal of Physics: Conference Series. — 2004. — V. 1. — 20–25.
11. Koukoulas T., Theobald P., Robinson S., Hayman G., Moss B. Particle velocity measurements using heterodyne interferometry and Doppler shift demodulation for absolute calibration of hydrophones // Journal of the Acoustical Society of America (POMA). — 2012. — 17. — P. 70022: 1–10.
12. Wang Min, Koukoulas T., Xing Guangzhen, He Longbiao, Yang Ping, Zhang Yue Measurement of underwater acoustic pressure in the frequency range 100 to 500 kHz using optical interferometry and discussion on associated uncertainties // Proceedings 25th International Congress on Sound and Vibration. — Hiroshima, 2018. — P. 1–6.

13. Ping Yang, Guangzhen Xing, Longbiao He Calibration of high-frequency hydrophone up to 40 MHz by heterodyne interferometer // Ultrasonics. — 2014. — 54. — P. 402–407.
14. Preston R.C., Robinson S.P., Zeqiri B., Esward T.J., Gelat P.N. and Lee N.D. Primary calibration of membrane hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 60 MHz // Metrologia. — 1999. — 36. — P. 331–343.
15. Koch Ch., Ludwig G., Molkenstruck W. Calibration of a fiber tip ultrasonic sensor up to 50 MHz and the application to shock wave measurement // Ultrasonics. — 36. — 1998. — P. 721–725.
16. Weber M., Wilkens V. Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of ultrasonic hydrophones in amplitude and phase // Metrologia. — 2017. — V. 54. — P. 432–444.
17. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. — М.: Изд-во Московского университета, 1960.
18. ГОСТ 17035-86 Пластмассы. Методы определения толщины плёнок и листов. — М.: Издательство стандартов, 1988.
19. ГОСТ 10388-81 Микрометры настольные со стрелочным отсчётным устройством. Технические условия.

Статья поступила в редакцию: 07.06.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 15.06.2021 г.

Статья принята в работу: 01.07.2021 г.