

Применение звукопроводящей полимерной плёнки для калибровки гидрофонов методами оптической интерферометрии

Александр Михайлович Еняков^{1✉}, Сергей Игоревич Кузнецов², Георгий Сергеевич Лукин³

^{1, 2, 3} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹enyakov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8183-3861>

²sergantex@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7674-8010>

³lukin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2912-9484>

Аннотация. Рассмотрена калибровка гидрофонов методом оптической интерферометрии с использованием тонкой звукопрозрачной полимерной плёнки (мембраны). Показано, что основной проблемой при реализации этого метода калибровки является оценка соответствия колебаний металлизированной стороны плёнки колебательным смещениям частиц воды под действием звуковой волны, падающей на плёнку. На основе упрощённой теории прохождения акустических плоских волн через слои разнородных материалов разработаны методы измерения скорости звука в применяемой плёнке и алгоритм расчёта частотной зависимости коэффициента прохождения звуковой волны (по колебательной скорости) из воды через плёнку в воду или воздух. Обосновано введение в результаты калибровки гидрофона поправки, учитывающей коэффициент прохождения звуковой волны, и оценена неопределённость этой поправки.

Ключевые слова: гидрофон, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, оптическая интерферометрия, полимерная металлизированная пленка, скорость звука

Для цитирования: Еняков А. М., Кузнецов С. И., Лукин Г. С. Применение звукопроводящей полимерной плёнки для калибровки гидрофонов методами оптической интерферометрии // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 61–66. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-5-61-66>

Application of a sound-conducting polymer foil for calibration of hydrophones by optical interferometry

Alexander M. Enyakov^{1✉}, Sergey I. Kuznetsov², Georgiy S. Lukin³

^{1, 2, 3} Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹enyakov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8183-3861>

²sergantex@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7674-8010>

³lukin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2912-9484>

Abstract. Modern calibration of hydrophones at megahertz frequencies is based on the method of optical interferometry, in which the vibrational velocity of an acoustic wave is measured using a thin sound-transparent polymer foil (membrane), metallized on one side to improve light reflection and installed in an ultrasonic field, followed by its replacement with a hydrophone to be calibrated. The main problem of implementing this calibration method is to assess the adequacy of tracking vibrations of the metallized side of the foil to vibrational displacements of water particles under the action of a sound wave incident on the opposite side of the foil. On the basis of the simplified theory of acoustic plane waves passing through layers of dissimilar materials, methods for measuring the speed of sound in the applied foil and an algorithm for calculating the frequency dependence of the sound wave transmission coefficient (in terms of vibrational velocity) from water through the foil to water or air, introduced as a correction to the results of hydrophone calibration, were developed. The uncertainty of the introduction of this correction is estimated.

Keywords: hydrophone, reflection coefficient, transmission coefficient, optical interferometry, polymer metallized foil, speed of sound

Введение. Метод оптической интерферометрии для калибровки гидрофонов на мегагерцевых частотах является относительно новым и применяется лишь в нескольких национальных метрологических институтах зарубежных стран. Преимущества этого метода по сравнению, например, с методом взаимности при калибровке гидрофонов

в свободном поле, стандартизованным IEC 60565:2006 “Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz” и традиционно применяемым в гидроакустике на более низких частотах, позволили рекомендовать его в качестве стандартного в диапазоне частот 1–40 МГц (IEC 62127-2:2017 “Underwater

acoustics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz”). Методы оптической интерферометрии предполагают измерение акустического смещения в акустическом поле, генерируемом преобразователем. Такие смещения улавливают с помощью тонкой полимерной мембраны или плёнки, установленной в акустическом поле перпендикулярно направлению распространения акустической волны и колеблющейся совместно с частицами среды распространения. Для обеспечения отражения лазерного луча поверхность плёнки (обычно толщиной в несколько микрометров) металлизуют. В дальнем поле преобразователя, т. е. 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 среде; ω – угловая частота; ξ – амплитуда акустического смещения без учёта разности фаз между давлением и смещением; v – амплитуда колебательной скорости частиц среды.

При калибровке мембрану заменяют калибруемым гидрофоном: чувствительный элемент гидрофона устанавливают в место расположения лазерного пятна на плёнке, при этом ось гидрофона должна совпадать с осью ультразвукового поля. Затем измеряют амплитудное значение напряжения на выходе гидрофона, соответствующее полученной из формулы (1) амплитуде акустического давления, и таким образом определяют чувствительность гидрофона на требуемой частоте.

Постановка задачи. Метод оптической интерферометрии реализуется на основе интерферометрической измерительной системы с двумя конфигурациями мембраны. В первом случае мембрану устанавливают в рамке в измерительном баке с водой перпендикулярно оси ультразвукового пучка излучателя, также 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. Ультразвуковая волна проходит сквозь плёнку практически без отражения и поглощения [1], однако происходит оптико-акустическое взаимодействие, связанное с периодическими изменениями показателя преломления воды в звуковом поле и влияющее на достоверность измерения смещения (или колебательной скорости) мембраны [2]. Такую конфигурацию мембраны применяют специалисты Национальной физической лаборатории Великобритании, в том числе, и в первичном эталоне единицы звукового давления в воде [3, 4].

При втором способе мембрану в рамке размещают на поверхности воды металлизированной стороной вверх для приёма зондирующего лазерного луча, а излучатель устанавливают в воде ниже мембраны так, чтобы ультразвуковой пучок был направлен вверх перпендикулярно мембране [5, 6].

В качестве наиболее подходящего для мембраны достаточно упругого материала повсеместно используется полиэтилентерефталат (ПЭТ), характеристики которого

регламентированы в ГОСТ 24234-80 «Плёнка полиэтилентерефталатная. Технические условия» (в зарубежных публикациях этот материал называют «майлар», в отечественных – «лавсан»). Для обоих вариантов построения интерферометрической измерительной системы наиболее важен вопрос соответствия колебаний металлизированной стороны плёнки ПЭТ и частиц воды под действием падающей на мембрану звуковой волны. В многочисленных публикациях, посвящённых реализации метода оптической интерферометрии, этой проблеме уделяется относительно мало внимания со 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 [7–9]. Однако такие утверждения требуют уточнений. Нет и достаточных обоснований для выбора толщины плёнки ПЭТ. Толщина плёнки при измерениях на различных частотах может составлять: 23 мкм (от нескольких сотен килогерц до единиц мегагерц) [8]; 15 мкм (до 500 кГц) [9]; 5 мкм (до 40 МГц) [10]; 3,5 мкм (1–60 МГц) [11]; 2 мкм (до 50 МГц [12] или 70 МГц [5]); 0,9 мкм (до 100 МГц) [13]. При этом разброс максимальных значений волновой толщины kd_1 плёнки (где $k = 2\pi f_b / c_1$ – волновое число; f_b – верхняя частота калибровки гидрофона; c_1 – скорость звука в плёнке; d_1 – толщина плёнки) составляет 0,022–0,63 по данным соответственно [9], [11]. Волновая толщина плёнки определяет влияние интерференционных эффектов при прохождении звуковой волны через плёнку, а значит, и частотную зависимость коэффициента прохождения ультразвуковой волны. Данную зависимость необходимо учитывать в виде отклонения колебательной скорости внешней (противоположной к источнику звука) стороны плёнки ПЭТ от колебательной скорости частиц воды при отсутствии плёнки. В результате калибровки гидрофона следует вводить поправки, связанные со свойствами плёнки. Цель настоящих исследований – обоснование указанных поправок.

Методы и результаты исследований. При изучении механизма прохождения плоской звуковой волны через слоистые среды для двух конфигураций мембраны следует рассмотреть два варианта прохождения звуковой волны:

из воды (среда 0) через полимерную плёнку (среду 1) толщиной d_1 , слой её металлизации (среду 2) толщиной d_2 в воду (среду 0), вариант реализуется при калибровке гидрофонов в [1, 3, 4, 7–9, 11];

из воды (среда 0) через полимерную плёнку (среду 1) толщиной d_1 , слой её металлизации (среду 2) толщиной d_2 в воздух (среду 3), вариант применяется в [5, 6, 10, 12, 13].

В обоих вариантах необходимо учитывать многократные отражения звуковой волны от поверхностей раздела каждой среды, характеризующихся удельными акустическими сопротивлениями $R_i = \rho_i c_i$, где ρ_i , c_i – плотность соответствующей среды и скорость звука в ней, индексы $i = 0 \dots 3$ относятся к указанным выше соответствующим средам. Учитывая, что толщины полимерной плёнки и её металлизированного слоя составляют несколько микрометров и 20–70 нм соответственно, то влиянием среды 2 на прохождение

ультразвуковой волны можно пренебречь. И тогда влияние мембраны определяется двумя известными условиями прохождения ультразвуковой волны через тонкий слой плёнки ПЭТ: из воды через плёнку в воду и из воды через плёнку в воздух [14].

Для первой конфигурации мембраны при нормальном падении ультразвуковой волны коэффициенты отражения r_p и прохождения t_p по давлению p можно выразить как [14]:

$$\left. \begin{aligned} r_p &= \left(\frac{R_0}{R_1} - \frac{R_1}{R_0} \right) \left[\sqrt{\left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_1}{R_0} \right)^2 + 4 \operatorname{ctg}^2 k_1 d_1} \right]^{-1} ; \\ t_p &= \left[\sqrt{\left(\frac{R_0}{R_1} + \frac{R_1}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{\sin k_1 d_1}{2} \right)^2 + \cos^2 k_1 d_1} \right]^{-1} . \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Коэффициент отражения r_p от плёнки в воде можно измерить с помощью гидрофона методом сравнения амплитуд сигналов, отражённых от плёнки и отражателя с известным коэффициентом отражения (например, пластины из нержавеющей стали или латуни толщиной более 20 мм), а коэффициент поглощения t_p плёнки в воде – методом сравнения амплитуд сигналов, принимаемых гидрофоном, который расположен за плёнкой, и гидрофоном в отсутствие плёнки. Достоверность измеряемых коэффициентов можно проверить по равенству, полученному из системы (2):

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

Согласно результатам эксперимента, проведённого авторами настоящей статьи на плёнке толщиной 3 мкм при частоте 5,1 МГц, разница между измеренным значением t_p и значением, вычисленным по измеренному значению r_p в соответствии с (3), не превышала 0,33 %. Эту разницу можно оценивать как погрешность измерения этих коэффициентов.

Измерения коэффициентов r_p , t_p актуальны для определения скорости звука в плёнке ПЭТ по выражениям (2), так как скорость звука в плёнке может варьироваться в зависимости от процесса её изготовления и толщины материала. Однако в сопроводительной документации на приобретаемую плёнку эта характеристика, как правило, отсутствует. Авторы указанных выше публикаций [3–10], как правило, не приводят конкретных данных по скорости звука в используемой ими плёнке, а, если такие данные и можно найти, то они противоречивы, например: $\rho_1 c_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [5] и $\rho_1 c_1 = 1,83 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [10].

Авторы настоящей статьи экспериментально исследовали прохождение ультразвуковой волны через плёнку ПЭТ толщиной 3 мкм с односторонним слоем алюминия толщиной 70 нм в диапазоне частот 1–20 МГц. Прогнозируемые значения скорости звука в плёнке подставляли в выражение (2) и находили минимальную разность результатов измеренных и вычисленных значений t_p . Этот минимум подтверждён на всех частотах измерения t_p и наиболее очевиден в верхнем диапазоне частот. Определённая по измеренным коэффициентам отражения и прохождения скорость звука в плёнке составила $(1950 \pm 10) \text{ м/с}$ (рис. 1).

Вторая конфигурация мембраны связана с решением задачи о проникновении колебательной скорости ультразвукового поля из воды (среда 0) через плёнку (среду 1) и тончайший металлизированный слой (среду 2) в воздух (среду 3). Согласно алгоритму расчёта частотной зависимости коэффициента прохождения ультразвуковой волны через плёнку толщиной $d_1 = 1 \dots 12 \text{ мкм}$ потери акустической энергии при прохождении через слой металла, например алюминия (и отражении от него), толщиной $d_2 = 20 \dots 70 \text{ нм}$ пренебрежимо малы, так как $k_1 d_1 > 200 k_2 d_2$. В этом случае коэффициент звукоизоляции η равен отношению энергии падающей на плёнку ультразвуковой волны к энергии волны, прошедшей сквозь плёнку в воздух, при нормальном падении [14]:

$$\eta = \left[\left(\frac{R_2}{R_0} + 1 \right)^2 - \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \sin^2 k_1 d_1 \right] 4 \frac{R_3}{R_0}. \quad (4)$$

Величина η^{-1} 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 ультразвуковой волны, прошедшей через плёнку, и падающей на неё из воды:

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

Заметим, что колебательная скорость звуковой волны при переходе через поверхность вода/воздух практически удваивается:

$$T_{\text{вд/взд}} = \frac{v_{\text{взд}}}{v_{\text{вд}}} = \frac{2R_{\text{вд}}}{R_{\text{вд}} + R_{\text{взд}}}.$$

Здесь индексы «вд», «взд» относятся соответственно к воде и воздуху. При $R_{\text{вд}} = 1,485 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и

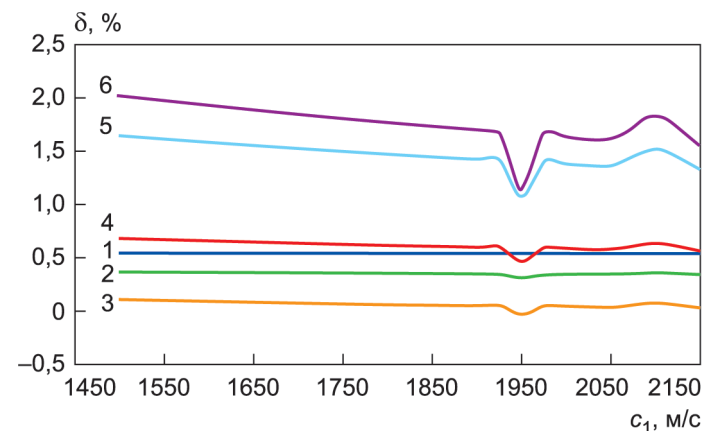


Рис. 1. Разность расчётных и измеренных значений коэффициента прохождения звукового давления через плёнку толщиной 3 мкм в зависимости от предполагаемой скорости звука c_1 в плёнке на частотах 1,5; 5,1; 7,5; 9,5; 15,5 и 19 МГц – кривые 1–6 соответственно

Fig. 1. The difference between the calculated and measured values of the sound pressure transmission coefficient through a foil with a thickness of 3 μm , depending on the estimated speed of sound in it at frequencies of 1.5, 5.1, 7.5, 9.5, 15.5 and 19 MHz – curves 1–6

$R_{взд} = 4,2 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ имеем $T_{вд/взд} = 1,9994$. Поэтому потери Δ_v (в процентах) колебательной скорости при переходе звуковой волны из воды через плёнку в воздух можно представить как

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

Из формулы (4) следует, что коэффициент звукоизоляции плёнки, а значит и коэффициент проникновения звуковой волны через плёнку, а также колебательная скорость частиц воды на границе раздела плёнка/воздух зависят от соотношения удельных акустических сопротивлений соседних сред распространения. Значения удельного акустического сопротивления воды и воздуха известны, а сведения об акустических параметрах (скорости звука, плотности) плёнки ПЭТ противоречивы. Вызывает вопросы и точность определения толщины плёнки, особенно при её минимально допустимых размерах. По ГОСТ 24234-80 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 17035-86 «Пластмассы. Методы определения толщины плёнок и листов» невозможно, поскольку этот стандарт ссылается на отменённые 30 лет назад нормативные документы (например, ГОСТ 10388-81 «Микрометры настольные со стрелочным отсчётным устройством. Технические условия») и рекомендуемое в них оборудование снято с производства 30 лет назад. Современные импортные приборы для измерения толщины плёнки ПЭТ, основанные на интерферометрических методах, практически недоступны.

Для введения поправок в частотную зависимость коэффициента прохождения T_v звуковой волны через плёнку необходимо точно знать толщину мембраны (плёнки). На рис. 2 представлены зависимости коэффициента T_v и доли потерь Δ_v колебательной скорости при прохождении звуковой волны через плёнку в воздух от 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)

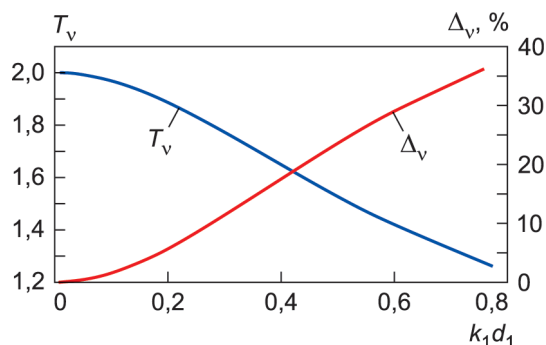


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения T_v колебательной скорости ультразвуковой волны и её потерь Δ_v через плёнку из воды в воздух от волновой толщины $k_1 d_1$ плёнки

Fig. 2. The dependence of the transmission coefficient T_v of the vibrational velocity of the ultrasonic wave (solid line) and its losses Δ_v (dotted line) through the foil from water to air on the wave thickness of the foil

на частоте 20 МГц). Скорость звука в плёнке принимали равной 1950 м/с, плотность $\rho = 1430 \text{ кг/м}^3$ плёнки соответствует проверенным литературным данным [5]. При $k_1 d_1 < 0,1$ (например, для плёнок толщиной 3 мкм на частотах 1–10 МГц или 5 мкм на частотах 1–5 МГц) коэффициент прохождения $T_v > 1,975$ и потери $\Delta_v < 1,3 \%$. Такие значения позволяют не вводить поправки в результаты измерений колебательной скорости ультразвуковой волны, так как введение поправок сопровождается неопределённостями, соизмеримыми в этом случае с значениями поправок.

Для плёнок большей толщины и/или для более высоких частот с существенными потерями колебательной скорости ультразвуковой волны необходимо обязательно вводить частотные поправки, но при этом следует оценивать возникающие при этом неопределённости. Их источники связаны с погрешностью установления параметров, входящих в выражение (5). Продифференцировав это выражение по d_1 , можно оценить влияние неопределённости определения

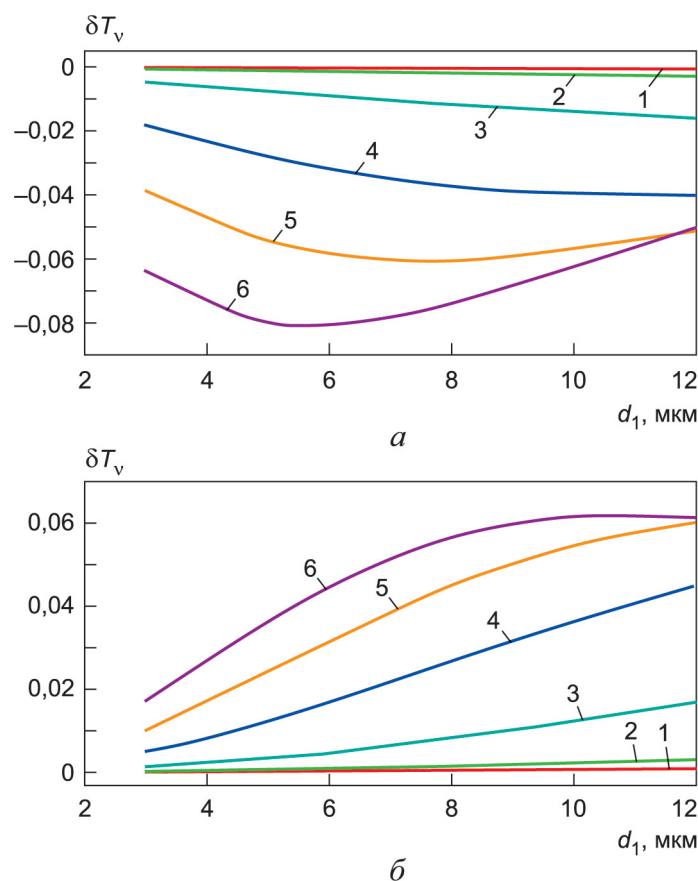


Рис. 3. Изменения коэффициента прохождения T_v колебательной скорости ультразвуковой волны через плёнку в воздух, обусловленные неопределённостью (а) и изменением в пределах допуска $\pm 10 \%$ (б) её толщины d_1 для различных значений d_1 на частотах 1; 2; 5; 10; 15; 20 МГц – соответственно кривые 1–6

Fig. 3. The change in the transmission coefficient of the ultrasonic wave through the foil into the air due to the uncertainty (a) and changing its thickness within the tolerance of $\pm 10 \%$ (b) of its thickness for different values of the foil thickness, the numbers indicate the curves 1–6 for the frequencies 1; 2; 5; 10; 15; 20 MHz

толщины плёнки на степень изменения коэффициента прохождения колебательной скорости через плёнку:

$$\frac{\partial(T_v)}{\partial d_1} = k_1 \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \sin^2 k_1 d_1 \times \\ \times \left[\left(\frac{R_3}{R_0} + 1 \right)^2 - \left(\frac{R_3^2}{R_1^2} - 1 \right) \left(\frac{R_1^2}{R_0^2} - 1 \right) \right]^{-3/2}. \quad (6)$$

Выражение (6) проиллюстрировано на рис. 3, а в виде зависимостей $\delta T_v(d_1)$ неопределённости введения поправки на толщину плёнки в коэффициент прохождения при изменении её толщины на частотах 1; 2; 5; 10; 15 и 20 МГц при скорости звука в плёнке 1950 м/с.

Если невозможно измерить реальную толщину плёнки, то целесообразно оценить достоверность введения частотных поправок в коэффициент прохождения T_v по данным производителя. В соответствии с ГОСТ 24234-80 плёнка ПЭТ высшего сорта толщиной 3–20 мкм должна выпускаться с допуском, не превышающим $\pm 10\%$ номинальной толщины. Результаты расчёта изменения T_v при вариациях толщины плёнки в пределах этого допуска, хотя и зависят от частоты звуковой волны, но не превышают $\pm 0,06$ ($\pm 3\%$) рассчитанных по формуле (5) значений даже для частоты 20 МГц. Для плёнок малой толщины (3–5 мкм) и более низких частот (менее 10 МГц) эти изменения существенно меньше (см. рис. 3, б).

Однако для плёнок более низкого сорта или плёнок с неизвестным допуском по толщине следует вводить поправки в коэффициент T_v по толщине в соответствии с формулой (2) и оценивать соответствующие неопределённости.

Заключение. Плёнки из полиэтилентерефталата широко используются для калибровки ультразвуковых гидрофонов методами оптической интерферометрии. При этом измеряют не акустическое давление, а колебательную скорость ультразвуковой волны, прошедшей через плёнку, т. е. важно, чтобы колебания плёнки совпадали с колебаниями частиц воды, что определяется параметрами плёнки – удельным акустическим сопротивлением и толщиной, которые необходимо учитывать.

На основе упрощённой теории прохождения акустических плоских волн через слои разнородных материалов разработан алгоритм расчёта частотной зависимости коэффициента прохождения звуковой волны из воды через плёнку в воду или воздух для плёнок различной толщины и с различным удельным акустическим сопротивлением. При этом предполагается, что затухание акустического пучка в слое металлизации толщиной менее 70 нм пренебрежимо мало. Применение созданного авторами настоящей статьи алгоритма такого расчёта позволило определить поправки на несоответствие колебаний металлизированной стороны плёнки колебаниям частиц воды при отсутствии плёнки и оценить неопределённость этих поправок. Разработанный авторами экспериментальный метод определения скорости звука в тонких звукопрозрачных плёнках позволил уточнить реальные значения скорости звука в используемой плёнке ПЭТ.

Список литературы

1. Koukoulas T. et al., *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*, January 2012, Edinburgh, UK. <https://doi.org/10.13140/2.1.4367.2005>
2. Drain L. E., Scruby C. B., *Laser Ultrasonics*, New York, Adam Hilger, 1990.
3. Bacon D. R., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1988, vol. 35, no. 2. <https://doi.org/10.1109/58.4165>
4. Esward T. J., Robinson S. P., *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 737–744. <https://doi.org/10.1109/58.764860>
5. Koch Ch., Molkenstruck W., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, vol. 46, no. 5, pp. 1303–1314. <https://doi.org/10.1109/58.796135>
6. Weber M., Wilkens V., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, pp. 432–444. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa72ba>
7. Bickley C. J., Zeqiri B., Robinson S. P., *Journal of Physics: Conference Series, Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine*, 2004, no. 1, pp. 20–25. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1/1/007>
8. 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, vol. 17, pp. 70022:1–10.
9. 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*, 8–12 July 2018, Hiroshima, Japan, pp. 1–6.
10. Ping Yang, Guangzhen Xing, Longbiao He, *Ultrasonics*, 2013, vol. 54 (1), pp. 402–407. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.07.013>
11. Preston R. C., Robinson S. P., Zeqiri B., Esward T. J., Gelat P. N., Lee N. D., *Metrologia*, 1999, vol. 36, pp. 331–343. <https://doi.org/10.1088/0026-1394>
12. Koch Ch., Ludwig G., Molkenstruck W., *Ultrasonics*, 1998, vol. 36 (1–5), pp. 721–725. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00121-2)
13. Weber M., Wilkens V., *Metrologia*, 2017, vol. 54, pp. 432–444. <https://doi.org/10.1088/1681-7575>
14. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М.: МГУ, 1960. 337 с.

References

1. Koukoulas T. et al., *Proceedings of the 11th European Conference on Underwater Acoustics*, January 2012, Edinburgh, UK. <https://doi.org/10.13140/2.1.4367.2005>
2. Drain L. E., Scruby C. B., *Laser Ultrasonics*, New York, Adam Hilger, 1990.
3. Bacon D. R., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1988, vol. 35, no. 2. <https://doi.org/10.1109/58.4165>
4. Esward T. J., Robinson S. P., *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, vol. 46, no. 3, pp. 737–744. <https://doi.org/10.1109/58.764860>

5. Koch Ch., Molkenstruck W., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, vol. 46, no. 5, pp. 1303–1314. <https://doi.org/10.1109/58.796135>
6. Weber M., Wilkens V., *Metrologia*, 2017, vol. 54, no. 4, pp. 432–444. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa72ba>
7. Bickley C. J., Zeqiri B., Robinson S. P., *Journal of Physics: Conference Series, Advanced Metrology for Ultrasound in Medicine*, 2004, no. 1, pp. 20–25. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1/1/007>
8. 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, vol. 17, pp. 70022:1–10.
9. 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*, 8–12 July 2018, Hiroshima, Japan, pp. 1–6.
10. Ping Yang, Guangzhen Xing, Longbiao He, *Ultrasonics*, 2013, vol. 54 (1), pp. 402–407. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.07.013>
11. Preston R. C., Robinson S. P., Zeqiri B., Esward T. J., Gelat P. N., Lee N. D., *Metrologia*, 1999, vol. 36, pp. 331–343. <https://doi.org/10.1088/0026-1394>
12. Koch Ch., Ludwig G., Molkenstruck W., *Ultrasonics*, 1998, vol. 36 (1–5), pp. 721–725. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00121-2)
13. Weber M., Wilkens V., *Metrologia*, 2017, vol. 54, pp. 432–444. <https://doi.org/10.1088/1681-7575>
14. Rzhavkin S. N., *Kurs lekciy po teorii zvuka*, Moscow, Moscow University Publ., 1960. 337 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.01.2021; принята к публикации 20.02.2021.