

УДК 389.629

О.Ш. Хакимов¹, Г.О. Хакимова², Н.А. Таджалиева³

¹ НИИ стандартизации, метрологии и сертификации Агентства «Узстандарт», Ташкент, Узбекистан

² Первый Ташкентский педагогический колледж, Ташкент, Узбекистан

³ Ташкентский государственный аграрный университет, Ташкент, Узбекистан

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ТВЕРДОЕ ТЕЛО – ЖИДКОСТЬ

Оценена неопределенность метода измерения коэффициента отражения ультразвуковой волны от границы раздела твердое тело (плавленый кварц) – жидкость (дистиллированная вода).

Ключевые слова: неопределенность, измерение, суммарная, стандартная, ультразвук, импеданс, коэффициент отражения.

Постановка проблемы и анализ последних достижений и публикаций

В жидкой вязкоупругой среде чисто сдвиговые колебания, как было впервые показано Стоксом [1], полностью затухают уже на расстоянии нескольких микрометров от возбуждающего их преобразователя. Поэтому для измерения динамической сдвиговой вязкости и упругости жидкостей используется косвенный акустический метод [2]. На мегагерцовых частотах для этой цели наиболее подходящим является импедансный метод, в котором эти величины определяются путём измерения комплексного коэффициента отражения r^* акустической волны от границы раздела твердое тело – жидкость

$$r^* = r \cdot e^{j(\pi-\vartheta)}, \quad (1)$$

где $r = |r^*|$ - модуль комплексного коэффициента отражения; ϑ – фазовый сдвиг в отраженной волне, обусловленный наличием жидкости, рад.

В [3] описана установка для измерения r^* импедансным методом в диапазоне частот 10-150 МГц. Для калибровки установки в качестве жидкости использована дистиллированная вода.

Модуль комплексного коэффициента отражения r определяют путем одновременного измерения амплитуд акустических сигналов до U_0 и после U нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленого кварца. Таким образом, двумя входными величинами являются U_0 и U , а выходной (измеряемой) величиной являются одна из составляющих комплексного r^* коэффициента отражения – его модуль r .

Измеряемая величина связана с входными величинами уравнением

$$r = (U / U_0)^{1-2m}, \quad (2)$$

где U_0 и U – амплитуды сигнала без жидкости и при ее наличии, В; m – номер рабочего эхо-сигнала.

Изложение основного материала

Предполагается, что пять независимых рядов одновременных наблюдений этих двух входных величин U_0 и U получены в одинаковых условиях, а результаты этих наблюдений приведены в табл. 1. Здесь же даны средние арифметические наблюдений \bar{U}_0, \bar{U} и экспериментальные стандартные отклонения $S(\bar{U}_0) = u(\bar{U}_0) = u_A(\bar{U}_0)$ и $S(\bar{U}) = u(\bar{U}) = u_A(\bar{U})$ этих средних, вычисленные из уравнений (3) и (4) [4].

$$u_A(\bar{U}_0) = S(\bar{U}_0) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (U_{0i} - \bar{U}_0)^2}, \quad (3)$$

$$u_A(\bar{U}) = S(\bar{U}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}, \quad (4)$$

где n – число наблюдений, $U_{0i}, U_i, \bar{U}_0, \bar{U}$ – i -ые и средние арифметические значения величин U_0 и U .

Вследствие того, что средние значения \bar{U}_0 и \bar{U} получают из одновременных наблюдений, предполагается что, они коррелированы, и эти корреляции должны приниматься во внимание при вычислении суммарной стандартных неопределенностей измеряемой величины r . Требуемые коэффициенты корреляции легко получают из уравнения

$$r(\bar{U}_0, \bar{U}) = u(\bar{U}_0, \bar{U}) / u(\bar{U}_0) \cdot u(\bar{U}), \quad |r(\bar{U}_0, \bar{U})| \leq 1, \quad (5)$$

используя значения $u(\bar{U}_0, \bar{U})$, вычисленные из уравнения

$$u(\bar{U}_0, \bar{U}) = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{k=1}^n (\bar{U}_{0k} - \bar{U}_0)(\bar{U}_k - \bar{U}). \quad (6)$$

Коэффициенты корреляции между результатами независимых наблюдений входных величин U_0 и U приведены в табл. 2, где следует помнить, что

$$r(\bar{U}_0, \bar{U}) = r(\bar{U}, \bar{U}_0); \quad r(\bar{U}_0, \bar{U}_0) = r(\bar{U}, \bar{U}) = 1. \quad (7)$$

Таблица 1

Результаты независимых рядов наблюдений входных величин U_0 и U , В

№	Частота, МГц											
	10,0		31,0		51,0		69,5		110		150	
	U_0	U	U_0	U	U_0	U	U_0	U	U_0	U	U_0	U
1	1,50	1,363	1,53	1,43	1,54	1,34	1,49	1,36	1,45	1,24	1,58	1,24
2	1,48	1,440	1,50	1,30	1,50	1,39	1,47	1,28	1,42	1,15	1,56	1,31
3	1,50	1,301	1,57	1,47	1,60	1,39	1,49	1,36	1,49	1,21	1,56	1,17
4	1,43	1,408	1,55	1,33	1,51	1,22	1,42	1,05	1,47	1,21	1,57	1,32
5	1,50	1,509	1,57	1,51	1,52	1,47	1,49	1,36	1,49	1,30	1,58	1,37
\bar{U}_0	1,48	1,40	1,54	1,41	1,53	1,36	1,47	1,28	1,46	1,22	1,57	1,28
$u_A(\bar{U}_0)$	0,012	0,04	0,014	0,04	0,017	0,04	0,012	0,06	0,013	0,02	0,005	0,04

Таблица 2

Анализ данных первым способом

Частота, МГц	10,0	31,0	40,0	51,0	69,5	89,0	110	129	150
$r(\bar{U}_0, \bar{U})$	-0,096	0,760	0,760	0,208	1,000	0,065	0,719	0,616	0,471
r	0,9896	0,9818	0,9793	0,9765	0,9765	0,9732	0,9694	0,9655	0,9627
$u_c(r), 10^{-3}$	5,35	4,43	4,42	5,77	7,50	8,48	2,84	3,57	5,15
$u_c^*(r), 10^{-3}$	5,20	5,88	5,86	6,22	9,24	8,56	4,18	4,65	5,42

Анализ экспериментальных данных проведен двумя способами. При анализе данных первым способом значения измеряемой величины r получают из зависимости, данных в уравнении (2). При этом используют средние значения входных величин U_0 и U , приведенных в табл. 1. Следовательно, первый способ является примером получения оценки u выходной величины Y из уравнения $y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_N)$. Стандартные неопределенности r получают из уравнения (8) [4]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad (8)$$

Как указывалось выше, входные величины \bar{U}_0 и \bar{U} коррелированы. При отождествлении \bar{U}_0 с x_1 , \bar{U} с x_2 и f с $r = (\bar{U} / \bar{U}_0)^{1/(2m-1)}$ уравнение (8) для суммарной неопределенности r дает:

$$u_c(r) = \sqrt{c_{\bar{U}}^2 \cdot u^2(\bar{U}) + c_{\bar{U}_0}^2 \cdot u^2(\bar{U}_0) + 2c_{\bar{U}} \times c_{\bar{U}_0} \cdot u(\bar{U}) \cdot u(\bar{U}_0) \cdot r(\bar{U}, \bar{U}_0)} = \sqrt{\left[\frac{\bar{r}}{2m-1}\right]^2 \cdot \left[\frac{u(\bar{U})}{\bar{U}}\right]^2 + \left[\frac{\bar{r}}{2m-1}\right]^2 \cdot \left[\frac{u(\bar{U}_0)}{\bar{U}_0}\right]^2 - 2 \cdot \left[\frac{\bar{r}}{2m-1}\right]^2 \cdot \left[\frac{u(\bar{U})}{\bar{U}}\right] \cdot \left[\frac{u(\bar{U}_0)}{\bar{U}_0}\right] \cdot r(\bar{U}, \bar{U}_0)}$$

или $u_c(r) = \frac{\bar{r}}{2m-1} \cdot \sqrt{u_o^2(\bar{U}) + u_o^2(\bar{U}_0) - 2 \times u_o(\bar{U}) \cdot u_o(\bar{U}_0) \cdot r(\bar{U}, \bar{U}_0)}$, (9)

где

$$c_{\bar{U}} = \frac{\partial f}{\partial \bar{U}} = \frac{1}{2m-1} \cdot \frac{1}{\bar{U}} \cdot (\bar{U} / \bar{U}_0)^{1-2m} = \frac{\bar{r}}{2m-1} \cdot \frac{1}{\bar{U}}$$

$$c_{\bar{U}_0} = \frac{\partial f}{\partial \bar{U}_0} = -\frac{1}{2m-1} \cdot \frac{1}{\bar{U}_0} \cdot (\bar{U} / \bar{U}_0)^{1-2m} = -(\bar{r} / (2m-1)) \cdot (1 / \bar{U}_0),$$

коэффициенты чувствительности $c_i = \partial f / \partial x_i$ оценки модуля комплексного коэффициента отражения r к изменениям значений амплитуды сигнала без жидкости U_0 и при ее наличии U , соответственно; $u(\bar{U}_0)$, $u(\bar{U})$ - стандартные неопределенности оценок амплитуд сигналов без жидкости U_0 и при ее наличии U , оцененные по (3) и (4), соответственно; $r(\bar{U}_0, \bar{U})$ - коэффициент корреляции, связанная с оценками U_0 и U , оцененная по (6); подстрочный индекс "о" в выражении (8) показывает, что « u » является относительной неопределенностью.

Подставив числовые значения из табл. 1 в уравнение (8), получаем соответствующие значения суммарных стандартных неопределенностей $u_c(r)$ (табл. 2). Результаты анализа данных вторым способом сведены в табл. 3. Так как данные были получены в виде пяти рядов наблюдений двух входных величин U_0 и U (табл. 1), то можно вычислить значения r из каждого ряда входных данных (табл. 3). Затем взять среднее арифметическое этих пяти значений для получения наилучших оценок r , т.е. второй способ является примером получения оценки u выходной величины Y из уравнения

$$\bar{y} = (\sum_{i=1}^n Y_i) / n \quad (10)$$

Экспериментальное стандартное отклонение $S(\bar{r})$ каждого среднего значения (которое является его суммарной стандартной неопределенностью $u(\bar{r})$) затем вычисляют из пяти отдельных значений обычным способом

$$u(\bar{r}) = u_A(\bar{r}) = \sqrt{(1/(n(n-1))) \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}, \quad (11)$$

Чтобы продемонстрировать этот способ, в табл. 3 даны значения γ , вычисленные в каждом из пяти рядов

наблюдений, их средние арифметические $\bar{\gamma}$ и стандартные неопределенности по типу А $u_A(\bar{\gamma})$.

Таблица 3

Значения γ вычисленные из каждого ряда входных данных U_0 и U , приведенных в табл. 1 (анализ данных вторым способом)

Частота, МГц	10,0	31,0	40,0	51,0	69,5	89,0	110	129	150
1	0,982	0,987	0,984	0,972	0,983	0,960	0,970	0,969	0,952
2	0,995	0,972	0,970	0,986	0,972	0,940	0,960	0,960	0,965
3	0,972	0,987	0,984	0,972	0,983	0,986	0,960	0,967	0,943
4	0,997	0,970	0,967	0,959	0,941	0,973	0,963	0,950	0,967
5	1,002	0,992	0,990	0,992	0,983	0,986	0,974	0,967	0,972
$\bar{\gamma}$	0,9894	0,9815	0,9790	0,9763	0,9724	0,9688	0,9654	0,9626	0,9599
$u(\bar{\gamma}), 10^{-3}$	5,37	4,45	4,44	5,85	8,01	8,60	2,81	3,61	5,21

В результатах, полученных этими двумя способами, нет расхождений в значениях выходной величины, стандартных неопределенностей, за исключением эффектов второго порядка, связанных с заменой таких членов как \bar{U} / \bar{U}_0 на \bar{U}/U_0 .

Как указывается в примечания к 4.1.4 [4], обычно эти два способа дают одинаковые результаты, если f является линейной функцией своих входных величин (при условии, что экспериментально наблюдаемые коэффициенты корреляции принимаются во внимание, когда применяется первый способ). Если f не является линейной функцией, тогда результаты, полученные первым способом, будут отличаться от результатов, полученных вторым способом, в зависимости от степени нелинейности, оцененных дисперсий и ковариаций X_1 . В данном случае предпочтение отдается второму способу, т.к. данный способ избегает аппроксимации

$$y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_N)$$

и лучше отражает использованную процедуру измерения - то, что данные фактически были собраны в ряды.

С другой стороны, второй способ будет неподходящим, если данные табл. 1 представляют $n_1 = 5$ наблюдений амплитуд U_0 акустического сигнала до нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленного кварца, за которыми следуют $n_2 = 5$ наблюдений амплитуд U акустического сигнала после нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленного кварца; и невозможным если $n_1 \neq n_2$ (фактически это плохая измерительная процедура - проводить измерение таким способом, т.к. амплитуды акустических сигналов до U_0 и после U нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленного кварца, непосредственно взаимосвязаны).

Если данные, приведенные в табл. 1 истолковать заново таким образом, чтобы второй способ оказался неприемлемым, и если предположить, что корреляции между величинами U_0 и U отсутствуют, то коэффициенты наблюдаемых корреляций не будут значимыми и их следует установить равными нулю. Если это сделать, то это приведет к изменени-

ям в значениях суммарной стандартной неопределенности, показанным также в табл. 2.

Выводы

В заключении отметим, что в результате исследования выявлены, что значения модуля комплексного коэффициента отражения γ^* акустической волны от границы раздела плавленный кварц – дистиллированная вода с повышением частоты от 10 до 150 МГц растёт на 2,7 %.

Показано, что в результатах, полученных первым

$$y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_N)$$

и вторым

$$\bar{y} = (\sum_{i=1}^n Y) / n$$

способами, нет расхождений в значениях выходной величины γ , стандартных неопределенностей $u_c(\bar{\gamma})$, за исключением эффектов второго порядка, если учитывается корреляция между входными величинами U_0 и U , в противном случае расхождение существенно.

Суммарная стандартная неопределенность метода измерения коэффициента отражения, реализованного аппаратурой [3], не более 0,9 %.

Список литературы

1. Рэлей Л. Теория звука, т. 2 / Л. Рэлей М., Гостехтеориздат, 1955. – 504 с.
2. Скимин Г. Мак. Ультразвуковые методы измерения механических характеристик жидкостей и твердых тел. Физическая акустика / Г. Мак Скимин (под рез. У. Мэзона) т. I, ч. А, гл. 4, 325-397, М., «Мир», 1966. – 589 с.
3. Григорьев С.Б. Измерение сдвиговых вязкоупругих свойств некоторых жидкостей / С.Б. Григорьев, И.Г. Михайлов, О.Ш. Хакимов // Акустический журнал - 1974. - Т.20, № 1. – С44-48.
4. Руководство по выражению неопределенности измерения: Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. – ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», С.–Петербург, 1999. – 134 с.

Поступила в редколлегию 1.04.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

**НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ
ВІД КОРДОНУ РОЗДІЛУ ТВЕРДЕ ТІЛО - РІДИНА**

О.Ш. Хакімов, Г.О. Хакімова, Н.А. Таджалієва

Оцінена невизначеність методу вимірювання коефіцієнта відбиття ультразвукової хвилі від кордону розділу тверде тіло (плавлений кварц) – рідина (дистильована вода).

Ключові слова: невизначеність, вимір, сумарна, стандартна, ультразвук, імпеданс, коефіцієнт відбиття.

**UNCERTAINTY OF THE METHOD OF MEASUREMENT OF COEFFICIENT OF REFLECTION THE ULTRASONIC
ARE FREE FROM BORDER I UNDRRESSED THE SOLID BODY – LIQUID**

O.S. Hakimov, G.O. Hakimova, N.A. Tadzhaliyeva

Uncertainty of a method of measurement of coefficient of reflection ultrasonic is estimated are free from limit of the section a solid body (melted quartz) – liquid (the distilled water) an impedance method.

Keywords: uncertainty, measurement, total, standard, ultrasound, impedance, reflection coefficient.