УДК 389.629

О.Ш. Хакимов[1], Г.О. Хакимова[2], Н.А. Таджалиева[3]

[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

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

где $r = |r^*|$ -модуль комплексного коэффициента отражения; □ – 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_o и после U нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленого кварца. Таким образом, двумя входными величинами являются U_o и U, а выходной (измеряемой) величиной являются одна из составляющих комплексного r* коэффициента отражения – его модуль r.

Измеряемая величина связана с входными величинами уравнением

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

где U_o 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].

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

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

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

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

$$r(\bar{U}_0, \bar{U}) = u(\bar{U}_0, \bar{U}) / u(\bar{U}_0) \cdot u(\bar{U}), \left|r(\bar{U}_0, \bar{U})\right| \le 1, \qquad (5)$$

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

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

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

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

Таблица 1

Результаты независимых рядов наблюдений входных величин U_o и U, В

№	Частота, МГц											
	10,0		**31,0**		**51,0**		**69,5**		**110**		**150**	
	U_o	**U**	**U_o**	**U**	**U_o**	**U**	**U_o**	**U**	**U_o**	**U**	**U_o**	**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

Анализы экспериментальных данных проведены 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_o и U, приведенных в табл. 1. Следовательно, первый способ является примером получения оценки y выходной величины Y из уравнения $y = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, ..., \bar{X}_N)$. 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 $r = \left(\bar{U} / \bar{U}_0\right)^{1/(2m-1)}$ 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 $$u_c(r) = \frac{\bar{r}}{2m-1} \cdot \sqrt{u_o^2(\bar{U}) + u_o^2(\bar{U}_0) - 2 \times u_o(\bar{U}) \cdot u_o(\bar{U}_0) \cdot r(\bar{U}, \bar{U}_0)}, \quad (9)$$

где

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

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

коэффициенты чувствительности $c_i = \partial f / \partial x_i$ оценки модуля комплексного коэффициента отражения r к изменениям значений амплитуды сигнала без жидкости U_o 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_o 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 y выходной величины Y из уравнения

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

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

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

Чтобы продемонстрировать этот способ, в табл. 3 даны значения r, вычисленные в каждом из пяти рядов наблюдений, их средние арифметические $\overline{r}$ и стандартные неопределенности по типу А $u_A(\overline{r})$.

Таблица 3

Значения r 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
$\overline{r}$	0,9894	0,9815	0,9790	0,9763	0,9724	0,9688	0,9654	0,9626	0,9599
$u(\overline{r})$, 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 $\overline{U} / \overline{U}_0$ на $\overline{U/U_0}$.

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

$$y = f(\overline{X}_1, \overline{X}_2, ..., \overline{X}_N)$$

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 плавленого кварца, за которыми следуют $n_2 = 5$ наблюдений амплитуд U акустического сигнала после нанесения жидкости на рабочую поверхность плавленого 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 плавленого 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 изменениям 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 r* акустической волны от границы раздела плавленый кварц – дистиллированная вода с повышением частоты от 10 до 150 МГц растёт на 2,7 %.

Показано, что в результатах, полученных первым

$$y = f(\overline{X}_1, \overline{X}_2, ..., \overline{X}_N)$$

и вторым

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

способами, нет расхождений в значениях выходной величины r, стандартных неопределенностей $u_c(\overline{r})$, 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 UNDRESSED 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.*