

УДК 534.8; 389.001.4

О.Ш. Хакимов<sup>1</sup>, К.О. Утаев<sup>1</sup>, У.О. Хакимов<sup>2</sup>, Ж.Н. Муродов<sup>1</sup><sup>1</sup> НИИ стандартизации, метрологии и сертификации Агентства «Узстандарт», Ташкент, Узбекистан<sup>2</sup> Агентство «Узстандарт», Ташкент, Узбекистан

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КОНТРОЛЯ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ АКУСТИЧЕСКИМ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

Оценена неопределенность контроля вязкоупругих свойств растительных масел, акустическим импедансным методом путём измерения частотной зависимости коэффициента отражения поперечной (сдвиговой) ультразвуковой волны от границы раздела плавленный кварц – растительное (соевое) масло. Обосновано использования метода линеаризации для оценивания коэффициента отражения и её точностных характеристик. Установлено, что наибольший вклад в суммарную стандартную неопределенность измерения коэффициента отражения, вносит неопределенность измерения амплитуды ультразвука после нанесения исследуемой жидкости на рабочую поверхность акустической ячейки.

**Ключевые слова:** контроль, вязкоупругость, коэффициент отражения, неопределенность, метод, суммарная, стандартная, ультразвук, импеданс.

### Введение

#### Постановка проблемы и анализ литературы.

При контроле вязкоупругих свойств жидкостей, в том числе растительных масел, одним из основных, а при изучения механизмов внутри и межмолекулярного взаимодействий в жидкостях при действии на них динамических сдвиговых возмущений, единственным средством являются акустические методы [1 – 6]. Эти методы основаны на измерении комплексного коэффициента отражения поперечной ультразвуковой волны от границы раздела твердое тело – исследуемая жидкость.

Для этой цели, в качестве модели для исследования, особый интерес представляют вязкие жидкости, у которых в исследуемом диапазоне частот ультразвука ожидается релаксация динамической сдвиговой вязкости и упругости. В качестве таковых жидкостей в данной работе использованы растительные масла: соевое и тунговое.

Для оценки степени надежности и достоверности, полученных при контроле результатов и суждений на их основе, несомненно, является актуальной оценкой их неопределенности.

**Актуальность работы.** В международном документе [7] «Руководство по выражению неопределенности измерений» (Руководство GUM), как известно, главным образом установлено общее правило оценивания и выражения неопределенности измерения. Они изложены в основном на более высоком уровне, не доступном каждому сотруднику, осуществляющие контроль в испытательных и калибровочных лабораториях.

Поэтому вопрос создания процедур оценки неопределенности конкретных измерений, основанных

на Руководстве GUM, несомненно, является актуальным.

**Целью работы** является разработка научной и методологической основы анализа неопределенности измерений коэффициента отражения сдвиговых ультразвуковых волн от границы раздела твердое тело – растительные масла импедансным методом.

### Изложение основного материала

Коэффициенты отражения  $\gamma$  сдвиговых ультразвуковых волн от границы раздела твердое тело – растительные масла (далее по тексту - коэффициента отражения) измерены в диапазоне частот (10-150) МГц на разработанной автором, двухканальной импульсной ультразвуковой измерительной установке [1, 8]. Искомое значение косвенно измеряемой величины  $\gamma$  находят на основании результатов измерений входных величин (аргументов)  $A_0$  и  $A$ , связанных с искомой величиной - коэффициентом  $\gamma$  отражения уравнением [1 – 3, 6]:

$$\gamma = \left( \frac{A}{A_0} \right)^k, \quad k = \frac{1}{2m-1}, \quad (1)$$

где  $A_0$  и  $A$  - амплитуды ультразвука до и после нанесения жидкости на поверхность акустической ячейки – плавленного кварца, соответственно;

$m$  - номер рабочего эхо-сигнала.

Номер рабочего эхо-сигнала  $m$ , в зависимости от вязкости жидкости выбирался в диапазоне от 2 (для вязкой жидкости) до 10 (для маловязкой жидкости – воды).

Входные величины  $A_0$  и  $A$  измерены путём проведения многократных ( $n=5$ ) наблюдений при температуре 20 °С. Полученные результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблиця 1

Результаты контроля частотной зависимости коэффициента  $\gamma$  отражения ультразвука от границы раздела плавленый кварц – соевое масла

f, MHz	10	30	70	90	110	150
$A_{0cp}$	4,81	4,82	4,80	4,82	4,83	4,84
$A_{cp}$	3,17	2,69	2,08	1,89	1,73	1,49
$\gamma$	0,92	0,89	0,85	0,83	0,81	0,79
$u_A(A_0)$	0,11	0,08	0,14	0,10	0,13	0,10
$u_A(A)$	0,10	0,08	0,07	0,03	0,05	0,07
$u_C(A_0)$	0,11	0,08	0,14	0,10	0,13	0,10
$u_C(A)$	0,10	0,08	0,07	0,03	0,05	0,07
$u_C(\gamma_{cp})$	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
$U(A_0)$	0,31	0,21	0,38	0,28	0,35	0,27
$U(A)$	0,27	0,22	0,20	0,09	0,15	0,19
$U(\gamma)$	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02

Таблиця 2

Результаты контроля частотной зависимости коэффициента  $\gamma$  отражения ультразвука от границы раздела плавленый кварц – тунговое масла

f, MHz	10	30	70	90	110	150
$A_{0cp}$	4,81	4,82	4,80	4,82	4,83	4,84
$A_{cp}$	2,70	2,15	1,60	1,39	1,40	1,06
$\gamma$	0,89	0,85	0,80	0,78	0,78	0,74
$u_A(A_0)$	0,11	0,08	0,14	0,10	0,13	0,10
$u_A(A)$	0,06	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05
$u_C(A_0)$	0,11	0,08	0,14	0,10	0,13	0,10
$u_C(A)$	0,06	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05
$u_C(\gamma_{cp})$	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
$U(A_0)$	0,31	0,21	0,38	0,28	0,35	0,27
$U(A)$	0,18	0,10	0,08	0,14	0,15	0,13
$U(\gamma)$	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

### Процедура оценивания неопределенности измерения

Из (1) следует, что потенциальными источниками неопределенности измерения коэффициента отражения  $\gamma$  являются неопределенности измерения входных величин  $A_0$  и  $A$ .

Неопределенности входных величин, обусловленные случайными эффектами, оценены по типу  $A$ . Неопределенности, вызванные систематическими эффектами: погрешностями генератора импульсов, высокочастотного генератора, блока переменной задержки, аттенюатора, осциллоскопа, а также округлением результатов вычислений, оценены по типу  $B$  и составляет 0,01  $V$ .

Поскольку измерение является косвенным и описывается нелинейной функцией (1), неопределенность выходной величины – коэффициента отражения  $\gamma$  оценена с учетом некоторых особенностей.

Для косвенных измерений при нелинейных зависимостях и некоррелированных неопределенностях измерений аргументов, как известно, используют *метод линеаризации*, а при коррелированных – *метод приведения*, который предполагает наличие ряда отдельных значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных наблюдений.

Поэтому нами в первую очередь определены коэффициенты корреляции между неопределенностями измерений входных величин по известной формуле и оценена их значимость. Значимость коэффициента корреляции, вычисленного по ограниченному количеству наблюдений ( $n = 5$ ), проверена по критерию Стьюдента (2) [9]

$$\left| \frac{\rho \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \right| < t_p(n-2), \quad (2)$$

где

$$t_p(n-2) = t_{0,95}(5-2) = 3,18 -$$

коэффициент Стьюдента для числа степеней свободы  $(n-2)=3$  для  $P = 0,95$ .

Проведенные нами оценки показали незначимость коэффициента корреляции.

Однако метод линеаризации допустим, если можно пренебречь остаточным членом  $R$ , при разложении функции в ряд Тейлора, который оценивается уравнением (3)

$$R = \frac{1}{2} \sum_j \frac{\partial^2 \gamma}{\partial A \partial A_0} (\Delta A)(\Delta A_0), \quad (3)$$

где  $\Delta A$  и  $\Delta A_0$  представляют собой максимальное отклонения  $i$ -го результата наблюдения от средних значений аргументов  $A$  и  $A_0$ , соответственно.

Применяя (3) к модели измерения (1) получим

$$R = \frac{k \cdot \gamma}{2} \left[ \begin{aligned} & (k+1) \cdot \frac{1}{A_0^2} \cdot (\Delta A_0)^2 + (k-1) \times \\ & \times \frac{1}{A^2} \cdot (\Delta A)^2 + 2k \cdot \frac{1}{A \cdot A_0} (\Delta A)(\Delta A_0) \end{aligned} \right]. \quad (4)$$

Остаточным членом  $R$ , как известно, пренебрегают, если выполняется неравенство

$$R < 0,8u_c(\gamma), \quad (5)$$

где  $u_c(\gamma)$  – суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента  $\gamma$  отражения.

Проведенные нами оценки показали выполнение этих условий (см. табл. 1 и 2).

Поэтому для оценивания косвенно измеряемой величины  $\gamma$  и её точностных характеристик исполь-

зованы метод линеаризации. Оценку результата измерения  $\gamma$  получают подстановкой в уравнение (модель) измерения (1) соответствующих оценок (средние арифметические значения) входных величин  $A$  и  $A_0$ ,

Результаты исследования коэффициента отражения сдвиговой ультразвуковой волны от гра-

ницы раздела твердое тело – растительные масла при температуре 20 °С в диапазоне частот 10-150 МГц показали, что он в исследованном диапазоне частот продолжает изменяться, т.е. релаксационный процесс, происходящий в исследуемой жидкости при воздействиях на неё динамических сдвиговых напряжений продолжается (рис. 1).

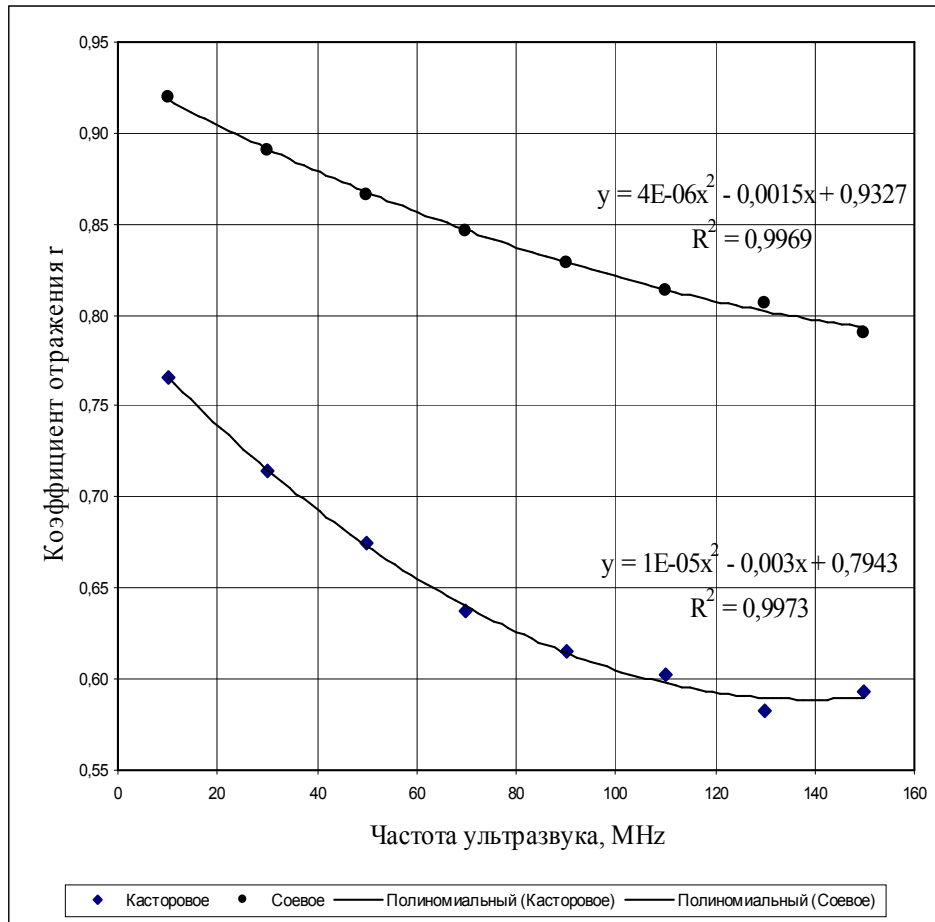


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента отражения

Суммарная стандартная неопределенность  $u_c(\gamma)$  измерения коэффициента отражения  $\gamma$ , как это следует из (1), определяется по формуле:

$$u_c(\gamma_{cp}) = \sqrt{\left(c_{A_0} \cdot u_c(A_0)\right)^2 + \left(c_A \cdot u_c(A)\right)^2}, \quad (6)$$

где  $c_{A_0}$  и  $c_A$  – коэффициенты чувствительности  $c_i = \partial f / \partial x_i$ , оценки коэффициента отражения  $\gamma$  к изменениям значений амплитуды сигнала без жидкости  $A_0$  и при ее наличии  $A$ , соответственно;

$u_c(A_0)$  и  $u_c(A)$  – суммарные стандартные неопределенности оценки амплитуд сигналов без жидкости  $A_0$  и при ее наличии  $A$ , соответственно.

Суммарная стандартная неопределенность  $u_c(\gamma)$  измерения коэффициента отражения  $\gamma$  в исследованном частотном диапазоне не более 1,5 %.

## Выводы

1. Измерены частотные зависимости коэффициента отражения поперечной (сдвиговой) ультразвуковой волны от границы раздела плавный кварц – растительные масла, при температуре 20 °С.

2. Обосновано использования метода линеаризации для оценивания коэффициента отражения и её точностных характеристик.

3. Получены формулы для оценки суммарных стандартных неопределенностей измерений коэффициента отражения сдвиговой ультразвуковой волне от границы раздела твердое тело – растительные масла. Оценены неопределенности измерений.

4. Наибольший вклад в суммарную стандартную неопределенность измерения коэффициента

отражения вносит неопределенность измерения амплитуды сигнала после нанесения на рабочую поверхность акустической ячейки исследуемой жидкости.

5. Результаты исследования коэффициента отражения сдвиговой ультразвуковой волны от границы раздела твердое тело – растительные масла при температуре 20 °С в диапазоне частот 10-150 МГц показали, что он в исследованном диапазоне частот продолжает изменяться, т.е. релаксационный процесс, происходящий в исследуемой жидкости в результате воздействий на неё динамическое сдвиговое напряжений, продолжается.

6. Суммарная стандартная неопределенность метода измерения коэффициента отражения, реализованного аппаратурой [1, 8], не более 1,5 %.

### Список литературы

1. Григорьев С.Б. Измерение сдвиговых вязкоупругих свойств некоторых жидкостей / С.Б. Григорьев, И.Г. Михайлов, О.Ш. Хакимов // Акустический журнал. – 1974. – Т. 20, № 1. – С 44-48.

2. Хакимов О.Ш. Неопределенность измерения сдвиговых вязкоупругостных свойств жидкостей ультразвуковым импедансным методом / О.Ш. Хакимов, А.А. Абдукаюмов, Р.Р. Джаббаров // Доклады XXI НАЦИОНАЛЕН НАУЧЕН СИМПОЗИУМ с международно участие «МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ 2012», 10-14 Септември 2012, г. Созопол. – С.47-52

3. Абдукаюмов А.А. Неопределенность метода измерения комплексного коэффициента отражения ультразвуковой волны от границы раздела твердое тело – жидкость / А.А. Абдукаюмов, Р.Р. Джаббаров, О.Ш. Хакимов // VIII Міжнародна науково-технічна конференція

«МЕТРОЛОГИЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГИЯ–2012)», Харків, 9–11 жовтня 2012 р. – С. 250 -253.

5. Хакимов О.Ш. Температурно-частотные зависимости динамических сдвиговых упругости и вязкости жидкости. Оценивание неопределенности измерений / О.Ш. Хакимов, Р.Р. Джаббаров, Г.Р. Джаббарова // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Системы - 2013» «Термография и термометрия, метрологическое обеспечение измерений и испытаний» 23-27 сентября 2013 года г. Львов, Украина. – С. 129

6. Хакимов О.Ш. Бюджет неопределенности измерения составляющих комплексного коэффициента отражения сдвиговых ультразвуковых волн от границы раздела твердое тело - хлопковое масло / О.Ш. Хакимов, Р.Р. Джаббаров, Г.Р. Джаббарова // Доклады XXIII НАЦИОНАЛЕН НАУЧЕН СИМПОЗИУМ с международно участие «МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ 2013», 9-13 Септември 2013, г. Созопол. – С.67-73

7. 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.

8. А.с. 1030720 СССР, МКП<sup>3</sup> G 01 N 29/00. Устройство для измерения коэффициента отражения и сдвига фазы акустических сигналов /Хакимов О.Ш., Резник Е.К., Карабаев М.К., Худайбердыев В.Н. - 3 с. Опубл. 23.07.83. Бюл. № 27. – С. 172.

9. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

Поступила в редколлегию 16.12.2014

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

### НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ КОНТРОЛЮ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИННИХ МАСЕЛ АКУСТИЧНИМ ІМПЕДАНСНИМ МЕТОДОМ

О.Ш. Хакімов, К.О. Утаєв, У.О. Хакімов, Ж.Н. Муродов

Оцінена невизначеність контролю в'язкопружних властивостей рослинних масел, акустичним імпедансним методом шляхом вимірювання частотної залежності коефіцієнта віддзеркалення поперечною (зсувною) ультразвуковою хвилею від межі розділу плавлених кварц – рослинне (соева) олія. Обґрунтовано використання методу лінеаризації для оцінювання коефіцієнта віддзеркалення і її точнісних характеристик. Встановлено, що найбільший внесок в сумарну стандартну невизначеність вимірювання коефіцієнта віддзеркалення, вносить невизначеність вимірювання амплітуди ультразвуку після нанесення досліджуваної рідини на робочу поверхню акустичного осередку.

**Ключові слова:** контроль, в'язкопружність, коефіцієнт віддзеркалення, невизначеність, метод, сумарна, стандартна, ультразвук, імпеданс.

### UNCERTAINTY OF CONTROL OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF VEGETABLE OILS USING ACOUSTIC IMPEDANCE METHOD

O.Sh. Hakimov, K.O. Utaev, U.O. Hakimov, J.N. Murodov

Uncertainty of control of viscoelastic properties of vegetable oils using the acoustic impedance method by measuring the frequency dependence of the reflection coefficient of transverse (shear) ultrasound free from the interface of fused silica - vegetable (soybean) oil is evaluated. Use of linearization method for estimating the reflectance and its accuracy characteristics is justified. It was found that the greatest contribution to the combined standard uncertainty of measurement of the reflection coefficient, making the measurement uncertainty of the amplitude after application of ultrasound test liquid on the work surface acoustic cell.

**Keywords:** control, viscoelasticity, reflectance, uncertainty, method, combined, standard, ultrasound, impedance.