

УДК 389.001.4

Р.Р. Джаббаров, О.Ш. Хакимов, Г.Р. Джаббарова

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

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ КАСТОРОВОГО МАСЛА УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИМПЕДАНСНЫМ МЕТОДОМ

*Рассматриваются акустические методы исследования жидкостей и особенности оценивания неопределенности измерений сдвиговых вязкоупругостных свойств касторового масла ультразвуковым импедансным методом. Приводятся результаты оценки активной и реактивной составляющих импеданса, модуля упругости и динамической сдвиговой вязкости касторового масла при температуре 20 °С в диапазоне частот 10-150 МГц и формулы, полученные авторами, для оценки их суммарных стандартных неопределенностей с учетом корреляций между входными величинами. Оценены неопределенности измерений.*

**Ключевые слова:** неопределенность, измерение, сдвиговое, вязкость, упругость, касторовое масло, ультразвук, импеданс.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Акустические методы исследования жидкостей [1] являются важным, а во многих случаях единственным средством изучения в них механизмов внутри и межмолекулярного взаимодействий. Эти методы основаны на изучении распространении как продольных, так и поперечных волн в жидкостях. Изучение распространения поперечных волн в жидкостях представляет особый интерес в связи с тем, что знание динамических сдвиговых свойств жидкости является одним из прямых путей исследования природы и характера процессов перестройки межмолекулярной структуры. Перестройка межмолекулярной структуры проявляются, конечно, также и в объемных деформациях. Однако в этом случае вместе с ней могут происходить дополнительные внутримолекулярные процессы, вызывающие появление объемной вязкости, что усложняет задачу. При исследовании же сдвиговых волн измеряемыми величинами являются только динамическая сдвиговая вязкость и упругость. В качестве объекта изучения особый интерес представляют вязкие жидкости, у которых в исследуемом диапазоне частот ожидается релаксация динамической сдвиговой вязкости и упругости. Таковой жидкостью в рассматриваемой работе является касторовое масло.

Акустические методы исследования динамических сдвиговых свойств жидкости в ультразвуковом диапазоне частот, как известно [2], основаны на измерении их акустического импеданса. В мегагерцовой области частот, комплексный акустический импеданс жидкости  $z_2$  определяется [3, 4] из комплексного коэффициента отражения  $r^*$  сдвиговой ультразвуковой волны от границы раздела твердое тело – жидкость по формуле

$$R_2 = z_1 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{1 - r^2}{1 + r^2 + 2r \cdot \cos \vartheta}; \quad (1)$$

$$X_2 = z_1 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{2r \cdot \sin \vartheta}{1 + r^2 + 2r \cdot \cos \vartheta}.$$

где  $R_2$  и  $X_2$  - активная и реактивная составляющие импеданса  $z_2$  исследуемой жидкости;

$$z_2 = R_2 + jX_2;$$

$z_1$  - акустический импеданс твердого тела;

$\varphi$  - угол падения ультразвуковых волн на границу раздела твердое тело – жидкость;

$r = |r^*|$ , а  $\vartheta$  - фазовый сдвиг в отраженной волне, обусловленный наличием жидкости.

Согласно (1), при известных значениях акустического импеданса  $z_1$  твердого тела (например, плавленого кварца) и заданном угле  $\varphi$  падения ультразвуковых волн на границу раздела твердое тело – жидкость для определения составляющих сдвигово-

го імпеданса досліджуваної рідини достатньо виміряти модуль коефіцієнта відбиття  $\gamma$  і кут  $\phi$  фазового зсуву.

Із експериментально виміряними значеннями  $\gamma$  і  $\phi$  за формулою (1) легко розрахувати активну  $R_2$  і реактивну  $X_2$  складові імпеданса досліджуваної рідини, а відповідно, її модуль пружності  $G'$  і динамічну зсувну в'язкість  $\eta$ , які пов'язані з  $R_2$  і  $X_2$  співвідношеннями

$$G' = \frac{R_2^2 - X_2^2}{\rho}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{R_2 \cdot X_2}{\pi \cdot \rho \cdot f},$$

де  $\rho$  – густина досліджуваної рідини;  $f$  – частота ультразвуку.

**Актуальність роботи.** Інтерес світової науки до питань оцінювання невизначеності вимірювань неважко помітити за численними міжнародними конференціями та семінарами, а також публікаціями в науково-технічних журналах, присвячених цій темі.

В міжнародному документі [5] «Руководство по выражению неопределенности измерений» (Руководство GUM) головним чином встановлено загальне правило оцінювання та вираження невизначеності вимірювання. Вони викладені в основному на більш високому рівні, доступному не кожному співробітнику випробувальних та калібрувальних лабораторій.

Не обговорюється питання про те, як оцінювати невизначеність конкретного результату вимірювання. Тому питання створення процедур оцінювання невизначеності конкретних вимірювань, ґрунтованих на Руководстві GUM, несомненно, є актуальним.

**Цілью роботи** є розробка наукової та методологічної основи оцінювання невизначеності вимірювань зсувних в'язкопружних властивостей касторового масла ультразвуковим імпедансним методом.

### Изложение основного материала

Вимірювання проводилися на імпульсній ультразвуковій установці [2, 3]. Результати вимірювань  $\gamma$  і  $\phi$ , а

також значення  $R_2$ ,  $X_2$ ,  $G'$  і  $\eta$  для касторового масла наведені в нижчезведеному таблиці, а їх частотні залежності на рис. 1 – 3.

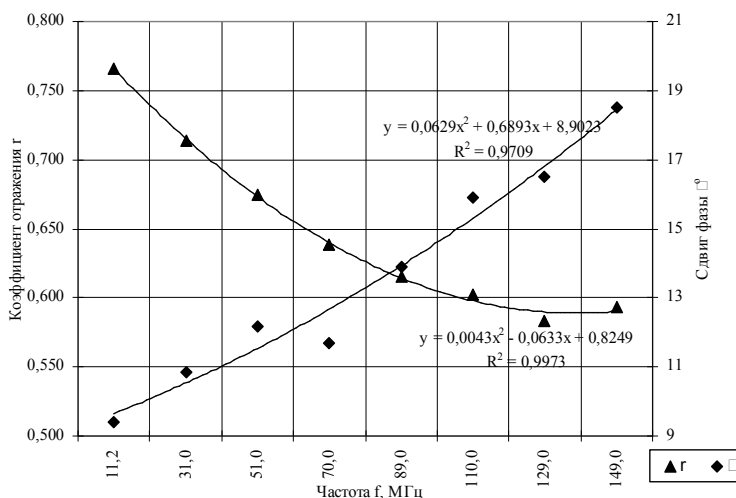


Рис. 1. Частотні залежності коефіцієнта відбиття і зсуву фази ультразвукової хвилі від межі розділу «плавлений кварц – касторове масло»

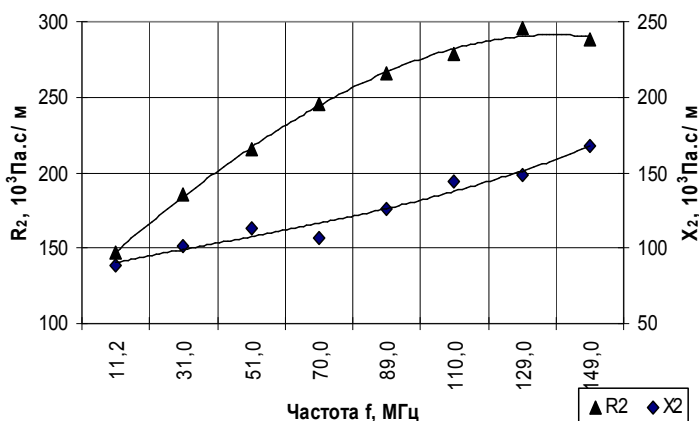


Рис. 2. Частотні залежності активної та реактивної складових зсувного акустичного опору касторового масла

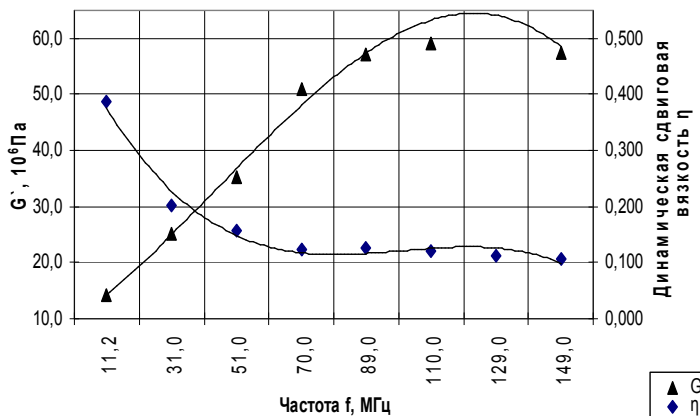


Рис. 3. Частотна залежність динамічних зсувних пружності та в'язкості касторового масла

Таблица 1

Результаты измерений

f, МГц	r	φ, °	R <sub>2</sub> ,	X <sub>2</sub>	G', 10 <sup>6</sup> Па	η
			10 <sup>3</sup> Па.с/ м			
11,2	0,766	9,40	147	89	14,2	0,392
31	0,714	10,8	185	101	25,0	0,199
51	0,675	12,2	216	113	35,3	0,158
70	0,638	11,7	246	107	51,0	0,124
89	0,615	13,9	266	126	57,2	0,124
110	0,602	15,9	278	144	59,1	0,121
129	0,583	16,5	295	148	68,1	0,120
149	0,593	18,5	288	167	57,4	0,108

**Процедура оценки неопределенности**

Из анализа метода, модели измерения r и φ, а также принципа работы установки [6] следует, что первоисточниками, влияющими на их точностные характеристики, следовательно, на неопределенности результатов их измерений, являются стандартные неопределенности измерения:

- амплитуд ультразвука до и после нанесения жидкости на поверхность акустической ячейки – плавленного кварца;
- частоты f ультразвука;
- времени t задержки сигнала;
- длины переменной линии задержки (при которой происходит компенсация сигналов рабочего и эталонного каналов) без жидкости I<sub>1</sub> и после нанесения жидкости I<sub>2</sub>;
- скорости (c) распространения электромагнитной волны в переменной линии задержки;
- акустического импеданса Z<sub>1</sub> плавленного кварца;
- угла φ падения ультразвуковых волн на границу раздела «плавленный кварц – исследуемая жидкость, наносимая на рабочую поверхность плавленного кварца»;
- градиента температуры в акустической ячейке.

Суммарные стандартные неопределенности u<sub>c</sub>(r), u<sub>c</sub>(φ) измерений модуля комплексного коэффициента отражения r и сдвига фазы ультразвуковой волны при отражения от границы раздела плавленный кварц – касторовое масло оценены аналогично [6].

Суммарные стандартные неопределенности u<sub>c</sub>(R<sub>2</sub>), u<sub>c</sub>(X<sub>2</sub>) измерения активной R<sub>2</sub> и реактивной X<sub>2</sub> составляющих импеданса исследуемой жидкости определяется по формуле

$$u_c(R_2) = \sqrt{c_{z_1}^2 \cdot u^2(z_1) + c_\phi^2 \cdot u^2(\phi) + c_r^2 \cdot u^2(r) + c_\vartheta^2 \cdot u^2(\vartheta) + 2 \left[ c_{z_1} \cdot c_r \cdot u(z_1, r) + c_{z_1} \cdot c_\vartheta \cdot u(z_1, \vartheta) + c_\phi \cdot c_r \cdot u(\phi, r) + c_\phi \cdot c_\vartheta \cdot u(\phi, \vartheta) + c_r \cdot c_\vartheta \cdot u(r, \vartheta) \right]}$$

где  $c_{z_1} = \cos \phi \cdot \frac{1-r^2}{1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta}$ ,

$$c_\phi = -z_1 \cdot \sin \phi \cdot \frac{1-r^2}{1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta},$$

$$c_r = -\frac{2z_1 \cdot \cos \phi}{(1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta)^2} \times \left[ r \cdot (1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta) + (1-r^2) \cdot (r+\cos \vartheta) \right],$$

$$c_\vartheta = z_1 \cdot \cos \phi \cdot \frac{(1-r^2) \cdot 2r \cdot \sin \vartheta}{(1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta)^2} - \text{коэффици-$$

енты чувствительности активной R<sub>2</sub> составляющей импеданса исследуемой жидкости к изменениям значений величин Z<sub>1</sub>, φ, r и φ соответственно;

$$c_{z_1} = \cos \phi \cdot \frac{2r \cdot \sin \vartheta}{1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta},$$

$$c_\phi = -z_1 \cdot \sin \phi \cdot \frac{2r \cdot \sin \vartheta}{1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta},$$

$$c_r = \frac{2z_1 \cdot \cos \phi \cdot (1-r^2) \cdot \sin \vartheta}{(1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta)^2},$$

$$c_\vartheta = z_1 \cdot \cos \phi \cdot \frac{2r \cdot \cos \vartheta \cdot (1+r^2) + 4r^2}{(1+r^2+2r \cdot \cos \vartheta)^2} -$$

коэффициенты чувствительности реактивной X<sub>2</sub> составляющей импеданса исследуемой жидкости к изменениям значений величин Z<sub>1</sub>, φ, r и φ соответственно;

u(Z<sub>1</sub>), u(φ), u(r), u(φ) - стандартные неопределенности оценок величин Z<sub>1</sub>, φ, r и φ, соответственно;

u(Z<sub>1</sub>,r), u(Z<sub>1</sub>,φ), u(φ,r), u(φ,φ), u(r,φ) – ковариация, связанная с оценками величин Z<sub>1</sub>, φ, r и φ.

Суммарные стандартные неопределенности u<sub>c</sub>(G') и u<sub>c</sub>(η) измерения модуля упругости G' и динамической сдвиговой вязкости η оценены по формулам

$$u_c(\eta) = \sqrt{c_{R_2}^2 \cdot u_c^2(R_2) + c_{X_2}^2 \cdot u_c^2(X_2) + c_\rho^2 \cdot u_c^2(\rho) + 2c_{R_2} \cdot c_{X_2} \cdot u(R_2, X_2)}$$

где  $c_{R_2} = \frac{2R_2}{\rho}$ ,  $c_{X_2} = -\frac{2X_2}{\rho}$ ,  $c_\rho = -\frac{R_2^2 - X_2^2}{\rho^2}$  -

коэффициенты чувствительности модуля упругости G' исследуемой жидкости к изменениям значений величин R<sub>2</sub>, X<sub>2</sub> и ρ соответственно;

$u_c(R_2)$ ,  $u_c(X_2)$ ,  $u_c(\rho)R_2$ ,  $X_2$  и  $\rho$  соответственно;

$u(R_2, X_2)$  – ковариация, связанная с оценками  $R_2$  и  $X_2$ ;

$$u_c(\eta) = \sqrt{c_{R_2}^2 \cdot u_c^2(R_2) + c_{X_2}^2 \cdot u_c^2(X_2) + c_{\rho}^2 \cdot u_c^2(\rho) + c_f^2 \cdot u_c^2(f) + 2c_{R_2} \cdot c_{X_2} \cdot u(R_2, X_2)}$$

где  $c_{R_2} = \frac{X_2}{\pi \cdot \rho \cdot f}$ ,  $c_{X_2} = \frac{R_2}{\pi \cdot \rho \cdot f}$ ,

$c_{\rho} = -\frac{R_2 \cdot X_2}{\pi \cdot \rho^2 \cdot f}$ ,  $c_f = -\frac{R_2 \cdot X_2}{\pi \cdot \rho \cdot f^2}$  – коэффициенты

чувствительности динамической сдвиговой вязкости  $\eta$  исследуемой жидкости к изменениям значений величин  $R_2$ ,  $X_2$ ,  $\rho$  и  $f$  соответственно;  $u(f)$  – стандартные неопределенности оценки частоты  $f$ .

Результаты оценки стандартных неопределенностей  $u_A(r)$  и  $u_A(\rho)$  типа А, а также суммарных стандартных неопределенностей  $u_c(R_2)$ ,  $u_c(X_2)$ ,  $u_c(G')$  и  $u_c(\eta)$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки стандартных неопределенностей

f, МГц	$u_A(r)$ , %	$u_A(\rho)$ , %	$u_c(R_2)$ , %	$u_c(X)$ , %	$u_c(G')$ , %	$u_c(\eta)$ , %
11,2	0,5	1,4	2,0	1,4	6,4	2,6
31	0,5	1,4	1,3	1,4	3,1	2,5
51	0,6	0,5	1,5	0,6	4,3	1,3
70	0,8	0,5	1,8	0,6	4,7	1,2
89	0,9	0,6	1,8	0,6	4,7	1,7
110	0,3	0,3	0,5	0,4	1,7	0,2
129	0,4	0,4	0,6	0,5	2,1	0,2
149	0,5	0,3	1,0	0,4	3,3	0,8

## Заключение

1. Рассмотрены акустические методы исследования жидкостей, которые являются важным, а во многих случаях единственным средством изучения в

них механизмов внутри и межмолекулярного взаимодействия.

2. Приведены результаты оценки активной и реактивной составляющих импеданса, модуля упругости и динамической сдвиговой вязкости касторового масла при температуре 20 °С в диапазоне частот 10-150 МГц.

3. Получены формулы для оценки суммарных стандартных неопределенностей измеренных величин с учетом корреляций между входными величинами. Оценены неопределенности измерений.

## Список литературы

1. Михайлов И.Г. Основы молекулярной акустики / И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников. – М.: Наука, 1964.
2. Григорьев С.Б. Измерение сдвиговых вязкоупругих свойств некоторых жидкостей / Григорьев С.Б., Михайлов И.Г., Хахимов О.Ш. // Акустический журнал - 1974. – Т. 20, № 1. – С44-48.
3. А.с. 1030720 СССР, МКІ<sup>3</sup> G 01 N 29/00. Устройство для измерения коэффициента отражения и сдвига фазы акустических сигналов / Хахимов О.Ш., Резник Е.К., Карабаев М.К., Худайбердыев В.Н. - 3 с. Оубл. 23.07.83. Бюл. № 27. -С. 172.
4. Джаббаров, Р.Р. Сдвиг фазы ультразвуковой волны отраженной от границы раздела твердое тело – жидкость / Р.Р. Джаббаров, А.А. Абдукаюмов, О.Ш. Хахимов // Химическая технология. Контроль и управление. – 2012. – № 5. – С. 46-50.
5. Руководство по выражению неопределенности измерения / Перевод с англ. под ред. проф. Слаева В.А. – ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», С.–Пб., 1999. – 134 с.
6. Хахимов, О.Ш. Неопределенность измерения сдвиговых вязкоупругостных свойств жидкостей ультразвуковым импедансным методом / О.Ш. Хахимов, 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

Поступила в редколлегию 14.02.2013

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

## НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ ЗСУВНИХ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КАСТОРОВОЇ ОЛІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ІМПЕДАНСНИМ МЕТОДОМ

Р.Р. Джаббаров, О.Ш. Хахимов, Г.Р. Джаббарова

Розглядаються акустичні методи дослідження рідин і особливості оцінювання невизначеності вимірювань зсувних в'язкопружних властивостей касторової олії ультразвуковим імпедансним методом. Наводяться результати оцінки активної і реактивної складових імпедансу, модуля пружності і динамічної зсувної в'язкості касторової олії при температурі 20 °С в діапазоні частот 10-150 МГц, та формули, що отримано авторами, для оцінки сумарних стандартних невизначеностей з урахуванням кореляцій між вхідними величинами. Оцінено невизначеності вимірювань.

**Ключові слова:** невизначеність, вимірювання, зсувне, в'язкість, пружність, касторове масло, ультразвук, імпеданс.

## UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

### SHIFT VISCOSITY-ELASTICITY PROPERTIES OF CASTOR OIL ULTRASOUND IMPEDANCE METHOD

R.R. Dzhabbarov, O.Sh. Khakimov, G.R. Dzhabbarova

Acoustic methods of liquids research and uncertainty estimation features of shear viscoelasticity properties of castor oil by the ultrasound impedance method are considered. Results of active and reactive impedance components' estimation, module's elasticity estimation, dynamic shear viscosity's estimation of castor oil at the temperature of 20 °C and the frequencies of 10-150 MHz are given. Formulas, for total standard uncertainty estimation was found by authors. They take into account the correlations between input quantities. Uncertainties of measurements are estimated.

**Keywords:** uncertainty, measuring, shear, viscosity, elasticity, castor oil, ultrasound, impedance.