ФИЗИКА

УДК 532.135:534.21
doi 10.18101/2306-2363-2016-4-37-41

**Б. Б. Бадмаев, Т. С. Дембелова, Д. Н. Макарова,
Б. Б. Дамдинов, Б. В. Бадархаев**

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ СДВИГОВЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ

В работе описан способ определения модуля сдвиговой упругости жидкостей резонансным акустическим методом. В качестве вибратора применен пьезокварцевый кристалл X-18,5^o среза с резонансной частотой 74 кГц. Измерены длины низкочастотных сдвиговых волн в полиэтилсилоксановой жидкости, по параметрам которых рассчитаны модули сдвига жидкостей и тангенсы угла механических потерь. Показано, что экспериментальные кривые хорошо согласуются с теоретическими.

Ключевые слова: *резонансный метод, жидкость, модуль сдвига, сдвиговая волна, тангенс угла механических потерь, ультразвуковой интерферометр*

**B. B. Badmaev, T. S. Dembelova, D. N. Makarova,
B. B. Damdinov, B. V. Badarkhaev**

LOW-FREQUENCY SHEAR WAVES IN LIQUIDS

The paper describes a method for determining the shear modulus of elasticity of liquids using resonance acoustic method. A piezoelectric crystal oscillator of X-18,5^o cut with resonance frequency of 74 kHz was applied as a vibrator. The lengths of the low-frequency shear waves in polyethylsiloxane liquid are measured, using these parameters shear moduli and tangent of the angle of mechanical loss of liquid were calculated. It is shown that the experimental curves are in good agreement with the theoretical ones.

Keywords: *resonance method, liquid, shear modulus, shear wave, tangent of the angle of mechanical loss, ultrasonic interferometer.*

Акустический резонансный метод

В работах [1-2] акустическим резонансным методом с применением пьезокварцевого резонатора была обнаружена и в дальнейшем всесторонне исследована сдвиговая упругость из обычных жидкостей при частотах сдвиговых колебаний порядка 10^5 Гц [3-9]. Суть акустического резонансного метода заключалась в следующем. Боковая горизонтальная поверхность пьезокварца соприкасается на одном конце с прослойкой исследуемой жидкости, накрытой твердой накладкой (рис. 1).

Накладка механическими приспособлениями может перемещаться по вертикали, чем регулируется толщина жидкой прослойки в широких пределах. При тангенциальных смещениях грани пьезокварца прослойка жидкости

испытывает деформации сдвига и в ней должны установиться стоячие сдвиговые волны. В зависимости от толщины жидкой прослойки изменяются параметры резонансной кривой пьезокварца: резонансная частота и ширина резонансной кривой. Максимум затухания сдвиговой волны будет наблюдаться при противофазе прямой и отраженной от накладки волны. Таким образом, можно осуществить ультразвуковой интерферометр на сдвиговых волнах в жидкостях.

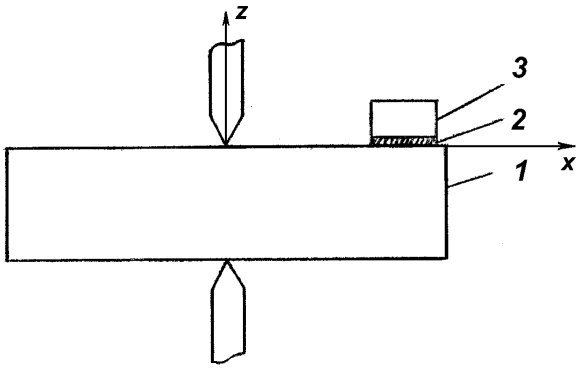

Рис. 1. Пьезокварц с добавочной связью: 1– пьезокварц, 2 — прослойка жидкости, 3 — накладка

Теория акустического резонансного метода [5] дает для комплексного сдвига резонансной частоты пьезокварца массы M следующее выражение:

$$\Delta f^* = \frac{S\chi G^*}{4\pi^2 M f_0} \cdot \frac{1+\cos(2\chi^* H - \varphi^*)}{\sin(2\chi^* H - \varphi^*)}, \quad (1)$$

где $G^* = G' + iG''$ – комплексный модуль сдвига жидкостей, S — площадь основания накладки, χ^* — комплексное волновое число, H — толщина жидкой прослойки, f_0 — резонансная частота, φ^* — комплексный сдвиг фазы при отражении волны от границы жидкость-накладка. Учитывая, что накладка из-за малой величины связи, осуществляемой прослойкой жидкости, практически покоится ($\varphi^* = 0$), для действительной $\Delta f'$ и мнимой $\Delta f''$ частей (1) можно получить:

$$\Delta f' = \frac{S}{4\pi^2 M f_0} \cdot \frac{(G'\beta + G''\alpha)\sin 2\beta H + (G'\alpha - G''\beta)\,\mathrm{sh}\, 2\alpha H}{\mathrm{ch}\, 2\alpha H - \cos 2\beta H}, \quad (2)$$

$$\Delta f'' = \frac{S}{4\pi^2 M f_0} \cdot \frac{(G'\beta + G''\alpha)\sin 2\beta H + (G''\alpha + G'\beta)\,\mathrm{sh}\, 2\alpha H}{\mathrm{ch}\, 2\alpha H - \cos 2\beta H}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что зависимость и действительного и мнимого сдвигов частот от толщины жидкой прослойки должны давать затухающие осцилляции. При этом первый максимум затухания будет располагаться на расстоянии равной половине длины сдвиговой волны в исследуемой жидкости. Используя соотношение $(\chi^*)^2 = \omega^2\rho / G^*$, из выражения (3) можно получить формулу для расчета действительного модуля сдвига в виде:

$$G' = \lambda^2 f_0^2 \rho \cos\theta \cos^2(\theta/2), \quad (4)$$

где f_0 — резонансная частота пьезокварца, ρ — плотность исследуемой жидкости, θ — угол механических потерь. Значение tgθ определяется измерением расстояния ΔH между положениями первого минимума и максимума действительного сдвига частоты [5]. Из теории метода каждому значению $\Delta H/\lambda$ соответствует определенное значение tgθ. Таким образом, для определения G' и tgθ достаточно измерить длину сдвиговой волны λ по положению максимумов затухания и расстояние ΔH.

В эксперименте применялся пьезокварц X-18.5° среза, у которого по литературным данным на рабочей поверхности коэффициент Пуассона равен нулю. Поэтому прослойка жидкости подвергалась чисто сдвиговым деформациям. Резонансная частота пьезокварца составляла 74 кГц. Были исследованы различные жидкости: спирты, гликоли, гомологические ряды углеводородов и полимерных жидкостей. Проведенные исследования показали, что особое значение для воспроизводимости результатов измерений имеет тщательная очистка рабочих поверхностей, обеспечивающая ее хорошее смачивание. Лишь «прочное сцепление» жидкости с рабочими поверхностями способно устранить явление проскальзывания между ними в процессе колебания пьезокварца. В противном случае из-за скольжения жидкости по поверхностям контакта отраженная от накладки волна приходит обратно на разные участки пьезокварца с различными фазами, и осцилляции сдвигов частот значительно сглаживаются.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В данной работе приведены результаты исследования полиэтилсилоксановой жидкости, которая является поверхностно-активной. На рис. 2 показаны экспериментальные результаты для ПЭС-3. Кривая 1 относится к действительному сдвигу частоты, а кривая 2 — к мнимому. Из рисунка следует, что для ПЭС-3 длина сдвиговой волны λ = 298 мкм. По формуле (4) для ПЭС-3 $G' = 3{,}1 \cdot 10^6$ дин/см^2. По значению $\Delta H/\lambda$ определено значение tgθ и оно равно 0,87. Для этих значений модуля сдвига и угла механических потерь по формулам (2) и (3) были рассчитаны теоретические зависимости $\Delta f'$ и $\Delta f''$ от толщины прослойки жидкости (сплошные на рис. 2). Видно, что экспериментальные кривые достаточно хорошо соответствуют теоретическим.

В работе [6] приведены результаты измерения G' полиэтилсилоксановой жидкости (ПЭС-3) акустическим резонансным методом при условии, когда толщина жидкой прослойки H много меньше длины сдвиговой волны λ. В данном эксперименте накладка достаточно малой массы свободно накрывала тонкую прослойку исследуемой жидкости. При этом рассчитанное значение модуля сдвига G' для ПЭС-3 составила $3{,}45 \cdot 10^6$ дин/см^2. Видно, что значение G', полученное данным методом, несколько больше значения, полученного на ультразвуковом интерферометре с жестко закрепленной накладкой. В реальных кристаллах, несмотря на выбор подходящего среза (X-18,5°) всегда существуют нормальные колебания. Поэтому при колебаниях пьезокварца исследуемая прослойка жидкости испытывает, кроме сдвиговых, дополни-

тельные деформации сжатия и растяжения. Этим объясняется некоторое различие полученных разными способами результатов.

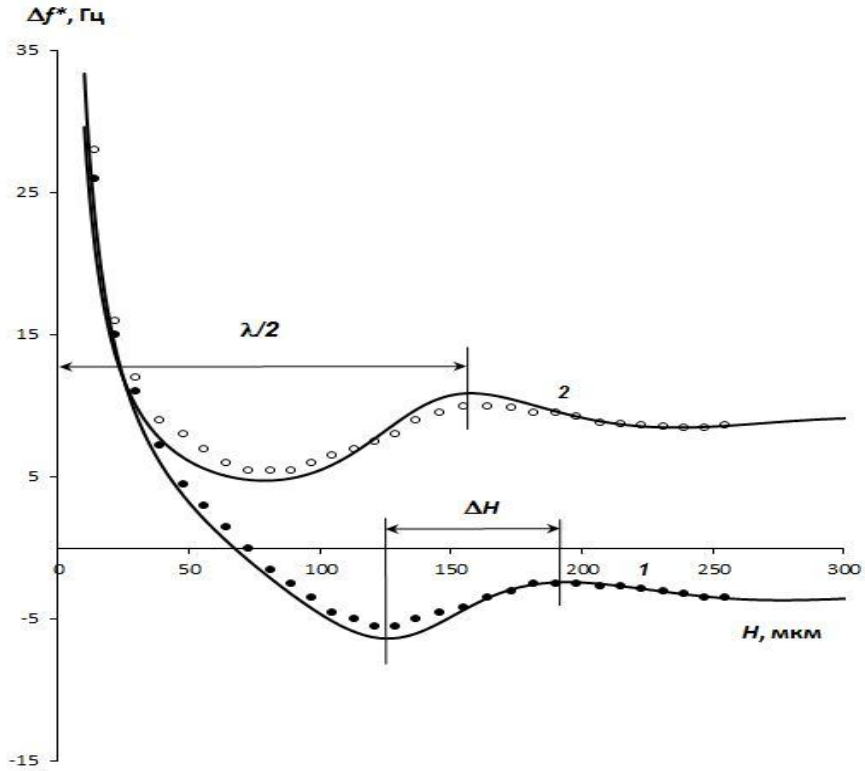

Рис. 2. Зависимости теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (точки) сдвигов частот от толщины жидкой прослойки для ПЭС-3: *1* — действительный, *2* — мнимый сдвиги частот.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН и частично поддержана грантами РФФИ (проект № 15-42-04319-р_сибирь_а, № 15-02-08204-а).

Литература

1. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Булгадаев А. В. О сдвиговой упругости граничных слоев жидкостей // Докл. АН СССР. — 1965. — Т. 160, № 4. — С. 799 — 803.
2. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Булгадаев А. В. Измерение сдвиговой упругости жидкостей и их граничных слоев резонансным методом // ЖЭТФ. — 1966. — Т. 51, Вып. 4(10) — С. 969-981.
3. Бадмаев Б. Б., Базарон У. Б., Будаев О. Р. и др. Исследование низкочастотного комплексного модуля сдвига жидкостей // Коллоидный журнал. — 1982. — Т. 54, № 5. — С. 841-846.
4. Бадмаев Б. Б., Бальжинов С. А., Дамдинов С. А., Дембелова Т. С. Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей // Акустический журнал. — 2010. — Т. 56, № 5. — С. 602-605.

5. Бальжинов С. А., Дембелова Т. С., Макарова Д. Н., Дамдинов Б. Б., Бадмаев Б. Б. Частотная и температурная зависимость низкочастотной (10^5 Гц) сдвиговой упругости жидкостей // Вестник Бурятского госуниверситета. — 2010. — Вып. 3. Химия. Физика. — С. 153-157.

6. Бадмаев Б. Б., Макарова Д. Н., Сандитов Д. С., Дамдинов Б. Б., Дембелова Т. С. Низкочастотная вязкоупругая релаксация в жидкостях // Изв. высших учебных заведений. Физика. — 2014. — Т. 57, № 6. — С. 34-39.

7. Дамдинов Б. Б., Барнаков Ю. А., Дембелова Т. С., Цыденова Д. Н. О возможности измерения сдвиговых механических свойств жидкостей различными резонаторами // Изв. вузов. Физика. — 2006. — Т. 49. — С. 22-24.

8. Бадмаев Б. Б., Будаев О. Р., Дембелова Т. С., Очирова Е. Р. Эффективный модуль сдвига жидкостей и его зависимость от степени смачиваемости поверхности пьезокварца // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2007. — Т. 13, № 1. — С. 79-85.

9. Сандитов Д. С., Бадмаев Б. Б., Дембелова Т. С., Дамдинов Б. Б. Низкочастотная сдвиговая упругость аморфных сред // Деформация и разрушение материалов. — 2009. — № 2. — С. 14-20.

Бадмаев Б.Б., доктор технических наук, заведующий лабораторией физики молекулярных структур, Институт физического материаловедения СО РАН, кафедра физики, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

Дембелова Т.С., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: tu_dembel@mail.ru

Макарова Д.Н., научный сотрудник, Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: dagzama@mail.ru

Дамдинов Б.Б., доктор физико-математических наук, декан физико-технического факультета Бурятского государственного университета, старший научный сотрудник, Институт физического материаловедения СО РАН, 670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, E-mail: dababa@mail.ru

Бадархаев Б.В., инженер, Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, e-mail: barik81@mail.ru

Badmaev B.B., Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of Molecular Structure Physics, Institute of Physical Materials Science SB RAS, Professor, East Siberia State University of Technology and Management, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6, E-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

Dembelova T.S., Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Institute of Physical Materials Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6, E-mail: tu_dembel@mail.ru

Makarova D.N., Researcher, Institute of Physical Materials Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoi Str., 6, E-mail: dagzama@mail.ru

Damdinov B.B., Doctor of Physics and Mathematics, Dean of the Faculty of Physical Engineering, Buryat State University, Senior Researcher, Institute of Physical Material Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6, E-mail: dababa@mail.ru

Badarkhaev B.V., Engineer, Institute of Physical Materials Science SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanooi Str., 6, E-mail: barik81@mail.ru