АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2017, том 63, № 6, с. 602–605

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 532.135

ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГОВОЙ УПРУГОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

© 2017 г. Б. Б. Бадмаев[a, *], Т. С. Дембелова[a], Б. Б. Дамдинов[a, b], Ч. Ж. Гулгенов[a]

[a] Институт физического материаловедения СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой 6

[b] Бурятский государственный университет
670000 Улан-Удэ, ул. Смолина 24а

*e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 30.12.2016 г.

Приведены экспериментальные результаты исследования низкочастотной (74 кГц) сдвиговой упругости полимерных жидкостей импедансным (аналогичным методу Мэзона) методом. На горизонтальную поверхность пьезокварца с размерами 34.7 × 12 × 5.5 см, совершающего тангенциальные колебания на резонансной частоте, нанесен свободный объем толстого слоя жидкости. Слой жидкости испытывает деформации сдвига, и в нем должны распространяться сдвиговые волны. Из теории метода следует, что действительный и мнимый сдвиги резонансной частоты с увеличением толщины слоя должны давать затухающие осцилляции и стремиться к предельным значениям. У исследованных в данной работе жидкостей оказалось, что мнимый сдвиг частоты намного больше действительного, что подтверждает наличие объемной сдвиговой упругости.

Ключевые слова: жидкость, импеданс, упругость, вязкость, пьезокварц, резонанс, релаксация, частота, деформация.

DOI: 10.7868/S0320791917050021

ВВЕДЕНИЕ

Исследование сдвиговых динамических свойств жидкостей является одним из прямых подходов к исследованию центральной проблемы физики жидкостей – природы и характера процессов перестройки ее структуры. Для изучения проблемы структурной релаксации жидкостей имеют наибольший интерес отклонения от ньютоновского поведения. В работах [1–3] было экспериментально доказано существование низкочастотной сдвиговой упругости у обычных маловязких жидкостей при частотах сдвиговых колебаний порядка 10^5 Гц. Известно, что согласно классическим представлениям сдвиговая упругость у жидкостей может наблюдаться при частотах 10^{10}–10^{12} Гц, сравнимых с частотой перескоков частиц жидкости из временных положений равновесия.

МЕТОД

Резонансные методы исследования механических свойств вязкоупругих материалов получили широкое распространение. Для этого производится измерение резонансных характеристик колебательной системы: входной импеданс электромеханического преобразователя, амплитуда вынужденных колебаний как функция частоты или частота и затухание свободных колебаний. Упругие силы в жидкости повышают собственную частоту вибратора, а вязкие – увеличивают затухание. Используются резонансные системы различных конфигураций [4–6]. Эти методы измерения перекрывают диапазон от низких до ультразвуковых частот.

В нашей работе применялся акустический резонансный метод измерения комплексного модуля сдвига жидкостей, в качестве излучателя использован пьезокварц. Пьезокварцевый кристалл X-18.5° среза в форме прямоугольного бруска совершает колебания сжатия и растяжения на основной резонансной частоте 74 кГц. Боковая горизонтальная поверхность, совершающая колебания в собственной плоскости, соприкасается с прослойкой жидкости, накрытой кварцевой накладкой. При этом прослойка жидкости испытывает чисто сдвиговые деформации, и в ней устанавливаются стоячие сдвиговые волны. В зависимости от толщины пленки изменяются параметры резонансной кривой системы. Приравнивая импедансы пьезокварца и жидкости, можно найти сле-

дующее выражение для комплексного сдвига резонансной частоты колебательной системы [3]:

$$\Delta f^* = \frac{SG^*\kappa^*}{4\pi^2 Mf_0}\frac{1+\cos(2\kappa^* H-\varphi^*)}{\sin(2\kappa^* H-\varphi^*)}, \quad (1)$$

где $G^* = G' + iG''$ – модуль сдвига жидкости с действительной и мнимой частями G' и G'' соответственно; S – площадь основания накладки; H – толщина жидкой прослойки; M – масса пьезокварца; f_0 – его резонансная частота; $\kappa = \beta - i\alpha$ – волновое число с действительной и мнимой частями β и α соответственно; φ^* – комплексный сдвиг фазы при отражении сдвиговой волны от границы жидкость–накладка. Разделение (1) на действительную $\Delta f'$ и мнимую $\Delta f''$ части дает для сдвигов частот следующие выражения:

$$\Delta f' = \frac{S}{4\pi^2 Mf_0}\times \frac{(G'\beta+G''\alpha)\sin 2\beta H+(G'\alpha-G''\beta)\mathrm{sh}2\alpha H}{\mathrm{ch}2\alpha H-\cos 2\beta H}, \quad (2)$$

$$\Delta f'' = \frac{S}{4\pi^2 Mf_0}\times \frac{(G''\beta-G'\alpha)\sin 2\beta H+(G''\alpha+G'\beta)\mathrm{sh}2\alpha H}{\mathrm{ch}2\alpha H-\cos 2\beta H}, \quad (3)$$

из которых можно видеть, что сдвиги частот дают затухающие осцилляции, стремящиеся при увеличении толщины прослойки к определенным предельным значениям $\Delta f'_\infty$ и $\Delta f''_\infty$. На рисунке показаны теоретические зависимости $\Delta f'$ и $\Delta f''$ от толщины прослойки жидкости H при $G' = 10^5$ Па и $\mathrm{tg}\theta = 0.3$. Согласно выражению (3) положения максимальных значений затухания располагаются на расстояниях, равных половине длины волны. Из теории метода можно получить три способа измерения модуля сдвиговой упругости жидкостей. Первый способ реализуется при толщине жидкой прослойки намного меньше длины сдвиговой волны, когда $H \ll \lambda$ [7–12], второй связан с распространением сдвиговой волны [13].

На измерении предельных значений $\Delta f'_\infty$ и $\Delta f''_\infty$ основывается третий способ определения сдвиговой упругости жидкости. При $H \to \infty$ сдвиговая волна полностью затухает, необходимость в твердой накладке отпадает, и вся горизонтальная поверхность пьезокварца может быть покрыта толстым слоем исследуемой жидкости. В этом случае из выражений (2), (3) следуют следующие расчетные формулы для определения действительного и мнимого модуля сдвига:

$$G' = \frac{16\pi^2 M^2}{S^2\rho}\left[(\Delta f''_\infty)^2-(\Delta f'_\infty)^2\right], \quad (4)$$

$$G'' = \frac{32\pi^2 M^2}{S^2}\frac{\Delta f'\Delta f''}{\rho}, \quad (5)$$

где S – площадь всей горизонтальной поверхности пьезокварца, ρ – плотность жидкости.

Предлагаемый метод определения модуля сдвига аналогичен импедансному методу Мэзона [14], где используются крутильные колебания пьезоэлектрического цилиндрического кристалла. Определение акустического импеданса по величине нагрузки на излучатель является одним из основных экспериментальных методов изучения вязкоупругих свойств жидкостей. Для активной и реактивной составляющей акустического сопротивления имеются следующие выражения [14]:

$$G' = \frac{R_s^2 - X_s^2}{\rho}, \quad (6)$$

$$G'' = \frac{2R_s X_s}{\rho}. \quad (7)$$

Таким образом, видна полная аналогия выражений для действительного модуля сдвига G' (4) и (6) и для мнимого модуля сдвига G'' (5) и (7), если положить, что

$$R = \frac{4\pi M}{S}\Delta f''_\infty, \quad (8)$$

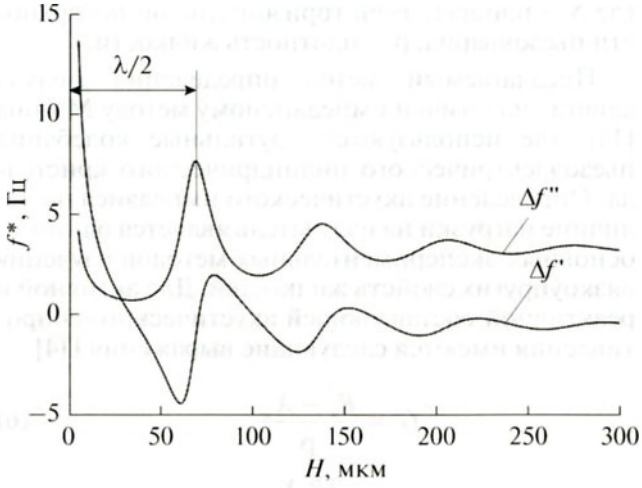
$$X = \frac{4\pi M}{S}\Delta f'_\infty. \quad (9)$$

Для ньютоновской жидкости $R = X$ или $\Delta f''_\infty = \Delta f'_\infty$, а при наличии упругости у жидкости $X < R$ или из (4) $\Delta f'_\infty < \Delta f''_\infty$.

Однако импедансный метод Мэзона испытывает экспериментальные трудности, связанные с малыми величинами коэффициента отражения сдвиговой волны от границы раздела жидкость–твердое тело и сдвига фаз [15]. Для повышения чувствительности метода Мэзона почти на порядок были использованы многократные отражения импульсов сдвиговой волны в работе [16]. На сравнительно низких частотах (до 10^8 Гц) применяется практически скользящее падение, что приводит к большой длине акустического пути. На более высоких частотах измерение фазы затруднено, поэтому не удалось получить надежные результаты для X. В работах [17–19] использован метод Мэзона, усовершенствованный использованием высокочастотной цифровой методики, позволяющей проводить анализ фазовых и амплитудных изменений отраженного сигнала, чем достигнуто упрощение экспериментальной установки и повышение чувствительности методики.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Предложенный нами метод определения комплексного модуля сдвига жидкостей наиболее прост в исполнении. На очищенную по методу, описанному в [10, 11], горизонтальную поверх-



Теоретические зависимости действительного $\Delta f'$ и мнимого $\Delta f''$ сдвигов резонансной частоты от толщины прослойки жидкости H.

ность пьезокварца с размерами 34.7 × 12 × 5.5 мм наносится слой исследуемой жидкости большой толщины и определяется комплексный сдвиг резонансной частоты относительно ненагруженного пьезокварца. Выбранный срез кристалла X-18.5° соответствует коэффициенту Пуассона, равному нулю. Данным методом исследуются жидкости, с которыми можно получить на поверхности пьезокварца слой жидкости достаточной толщины, где сдвиговая волна полностью затухает. К ним относятся жидкости с большим значением поверхностного натяжения, а также вязкие жидкости. Хорошо измеряются данным методом сдвиговая упругость воды и гликолей, а также полиметилсилоксановых жидкостей (ПМС). Существенным фактором, определяющим точность измерений, является достаточно чистое тангенциальное движение рабочей грани пьезокварца, так как из-за наличия нормальной компоненты на рабочей поверхности пьезокварца, всегда присутствующей у реального кристалла, в определение действительного сдвига частоты вносит вклад присоединенная масса прослойки исследуемой жидкости. Однако если тангенс угла механических потерь $\mathrm{tg}\theta = \frac{G''}{G'} < 1$, то при расчете G' по выражению (4) величиной действительного сдвига частоты можно пренебречь, так как вносимый им вклад не превышает 3%.

Так, для полиметилсилоксановой жидкости ПМС-100 измеренное предельное значение мнимого сдвига частоты $\Delta f''_\infty$ составило 15 Гц, для ПМС-200 – 19 Гц. Расчет по формуле (4) действительного модуля сдвига G' для этих жидкостей дает значения 0.43×10^5 и 0.6×10^5 Па соответственно. При измерении действительного модуля сдвига первым способом при $H \ll \lambda$ были получены значения $G' = 0.6 \times 10^5$ Па для ПМС-100 и 0.86×10^5 Па для ПМС-200 [13]. Сравнение этих данных показывает удовлетворительное согласие с результатами, полученными в настоящей работе. Небольшое расхождение в значениях объясняется тем, что при полном нагружении поверхности пьезокварца толстым слоем исследуемой жидкости толщина слоя из-за мениска неравномерна.

Таким образом, измерение сдвиговой упругости жидкостей двумя способами акустического резонансного метода с применением пьезокварцевого резонатора и удовлетворительное согласие полученных результатов говорит о том, что низкочастотная сдвиговая упругость является их объемным свойством. Это доказывает, что в жидкостях существует неизвестный ранее низкочастотный (10^5 Гц) вязкоупругий релаксационный процесс.

Работа частично поддержана грантами РФФИ, проекты № 15-42-04319 и РФФИ № 15-02-08204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В.* О сдвиговой упругости граничных слоев жидкостей // ДАН СССР. 1965. Т. 160. № 4. С. 799–803.
2. *Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В.* Исследование сдвиговой упругости жидкостей и граничных слоев резонансным методом // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. № 4 (5). С. 969–982.
3. *Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Будаев О.Р.* Измерение комплексного модуля сдвига жидкостей // ДАН СССР. 1972. Т. 205. № 6. С. 1324–1327.
4. *Есипов И.Б., Зозуля О.М., Фокин А.В.* Резонансный метод измерения сдвиговых вязкоупругих свойств жидких сред на основе возбуждения крутильных колебаний в трубках // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 124–134.
5. *Fritz G., Pechhold W., Willenbacher N., Wagner N.J.* Characterizing complex fluids with high frequency rheology using torsional resonators at multiple frequencies // J. Rheol. 2003. V. 47. Iss. 2. P. 303–319.
6. *Bund A., Schwitzgebel G.* Viscoelastic properties of low-viscosity liquids studied with thickness-shear mode resonators // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 2584–2588.
7. *Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б.* Исследование вязкоупругих свойств органических жидкостей акустическим методом // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 561–563.
8. *Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б., Сандитов Д.С.* Низкочастотные сдвиговые параметры жидких вязкоупругих материалов // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 2. С. 156–160.
9. *Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С.* Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 5. С. 602–605.
10. *Badmaev B., Dembelova T., Damdinov B., Makarova D., Budaev O.* Influence of surface wettability on the accuracy of measurement of fluid shear modulus // Colloids

and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2011. V. 383. P. 90–94.

11. *Бадмаев Б.Б., Макарова Д.Н., Сандитов Д.С., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С.* Низкочастотная вязкоупругая релаксация в жидкостях // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 6. С. 34–39.
12. *Бадмаев, Б.Б. Дембелова Т.С., Макарова Д.Н., Гулгенов Ч.Ж.* Сдвиговая упругость и прочность структуры жидкости на примере диэтиленгликоля // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 1. С. 18–21.
13. *Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С.* Распространение сдвиговых волн в полимерных жидкостях // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 5. С. 610–614.
14. *Мэзон У.* Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике. М.: ИЛ, 1952. 720 с.
15. *Мак-Скимин Г.* Ультразвуковые методы измерения механических характеристик жидкостей и твердых тел / В кн. "Физическая акустика", ч. А, под ред. Мэзона У. М.: Мир, 1966. 592 с.
16. *McSkimin H.J., Andreatch P.* Measurement of dynamic shear impedance of low viscosity liquids at ultrasonic frequencies // J. Acoust. Soc. Am. 1967. V. 42. P. 248–252.
17. *Alig I., Lellinger D., Sulimma J., Tadjbakhsch S.* Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of the viscoelastic properties of polymer films // Rev. Sci. Instr. 1997. V. 68. № 3. P. 1536–1542.
18. *Beukema G.J., Mellema J.* Measuring system for complex shear modulus of liquids using tortionally vibrating quartz crystals // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1981. V. 14. P. 418–420.
19. *Yoshizaki H.* Measurement of viscoelastic properties of polymer solutions by tortional crystals // Polymer Journal. 1993. V. 25. № 6. P. 553–559.