

Акустическое исследование нелинейных вязкоупругих свойств жидкостей

Б. Б. Бадмаев^{1,*}, Т. С. Дембелова^{1,†}, Б. Б. Дамдинов^{1,2,‡}, Д. Н. Макарова^{1,§}, Е. Д. Намдакова¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН, Россия, 670047, Улан-Удэ, ул.Сахьяновой, д. 6

²Бурятский государственный университет, Россия, 670000, Улан-Удэ, ул.Смолина, д. 24а

(Статья поступила 11.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследования комплексного модуля сдвига и эффективной вязкости от угла сдвиговой деформации на примере триэтиленгликоля с использованием акустического резонансного метода.

PACS: 62.10.+s; 64.70.pm; 83.60.Df

УДК: 532.135

Ключевые слова: resonance method, liquid, viscosity, shear elasticity, deformation, rheology.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] акустическим резонансным методом впервые было показано, что жидкость независимо от вязкости и полярности обладает сдвиговой упругостью при частоте сдвиговых колебаний порядка 10^5 Гц. Дальнейшее всестороннее исследование, проведенное в зависимости от толщины жидкой прослойки [3, 4] и по распространению сдвиговых волн [5–7], показало, что низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей является их объемным свойством. Это говорит о том, что в жидкостях наряду с высокочастотным релаксационным процессом, существует низкочастотная вязкоупругая релаксация, определяемая коллективными взаимодействиями больших групп молекул (кластеров).

Как показано в работах [8, 9], полярные жидкости при определенных условиях (например, в покое) обладают упорядоченной структурой, которая разрушается при больших сдвиговых нагрузках, при этом изменяются реологические параметры, а затем за определенное время релаксирует к первоначальному состоянию. Поэтому представляется важным исследование сдвиговой упругости и вязкости жидкостей в зависимости от величины деформации.

В данной работе представлено экспериментальное исследование комплексного модуля сдвига и эффективной вязкости триэтиленгликоля от угла сдвиговой деформации акустическим резонансным методом.

1. ТЕОРИЯ МЕТОДА

Метод измерения сдвиговой упругости жидкостей основан на применении пьезокварцевого кристалла в виде прямоугольного бруска $X-18.5^\circ$ среза [1–4], у которого на грани, перпендикулярной оптической оси,

коэффициент Пуассона равен нулю. Пьезокристалл, закрепленный по узловой линии и колеблющийся на основной резонансной частоте в собственной плоскости, соприкасается на одном конце с прослойкой исследуемой жидкости, накрытой кварцевой накладкой (рис. 1). При этом прослойка жидкости будет испытывать деформации сдвига и в ней должны установиться стоячие сдвиговые волны. В зависимости от толщины прослойки жидкости изменяются резонансная частота и ширина резонансной кривой пьезокварца. При наличии у жидкостей сдвиговой упругости резонансная частота будет возрастать по сравнению с частотой свободного пьезокварца, что и наблюдается в эксперименте. Если бы в прослойке действовали только диссипативные вязкие силы, то резонансная частота должна была бы уменьшаться.

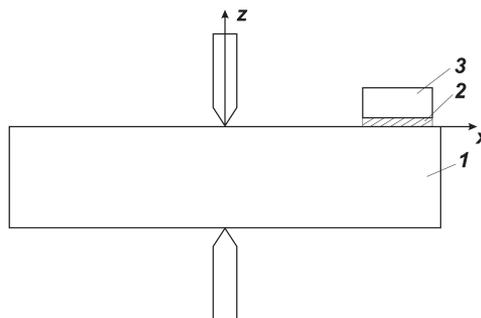


Рис. 1: Пьезокварц с добавочной связью: 1 — пьезокварц, 2 — прослойка жидкости, 3 — накладка

Из теории метода [5, 7] были получены выражения для действительного и мнимого компонентов комплексного модуля сдвига G^* и тангенса угла механических потерь $\text{tg } \theta$:

$$G' = \frac{4\pi^2 M f_0 \Delta f' H}{S}, \quad G'' = \frac{4\pi^2 M f_0 \Delta f'' H}{S} \quad (1)$$

$$\text{tg } \theta = \frac{G''}{G'} = \frac{\Delta f''}{\Delta f'}$$

где $G^* = G' + iG''$ — комплексный модуль сдвига жидкости, H — толщина жидкой прослойки между пьезокварцем и накладкой, M — масса пьезокварца, f_0 —

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

†E-mail: tu_dembel@mail.ru

‡E-mail: dababa@mail.ru

§E-mail: dagzama@mail.ru

его резонансная частота, $\Delta f''$ и $\Delta f'''$ — действительный и мнимый сдвиги резонансной частоты, S — площадь основания накладки.

Из этих формул видно, что при наличии у жидкости постоянного комплексного модуля сдвига зависимости действительного $\Delta f'$ и мнимого $\Delta f''$ сдвигов резонансной частоты от обратной величины толщины жидкой прослойки $1/H$ должны быть линейными. Мнимый сдвиг резонансной частоты $\Delta f'''$ определяется изменением затухания колебательной системы.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В наших экспериментах применялся пьезокварцевый кристалл в виде прямоугольного бруска размерами $34.9 \times 12 \times 6$ мм³, массой 6.82 г и с резонансной частотой 73 кГц. Площадь основания накладки $S = 0.2$ см².

В работе [10] были экспериментально получены линейные зависимости действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины жидкой прослойки для триэтиленгликоля. Согласно выражениям (1) это означает наличие у исследованной жидкости сдвиговой упругости при частоте колебаний 73 кГц. Расчет действительного модуля сдвига по (1) для триэтиленгликоля дало значение $G' = 1.27 \times 10^5$ Па, а для тангенса угла механических потерь $\text{tg } \theta = 0.27$.

Ценная информация о природе наблюдаемого явления была получена при исследовании сдвиговой упругости жидкостей в зависимости от угла сдвиговой деформации. Угол деформации, при его малых значениях, определяется как отношение амплитуды колебания пьезокварца A к толщине жидкой прослойки H . Для измерения абсолютного значения амплитуды колебания пьезокварца был использован метод, основанный на принципе работы интерферометра Фабри–Перо [4].

Зависимости действительного G' и мнимого G'' модулей сдвига триэтиленгликоля от угла сдвиговой деформации показаны на рис. 2. Для удобства (наглядности) угол деформации A/H приведен от квадратного корня. Видно, что упругие свойства жидкости изменяются с увеличением угла сдвиговой деформации. При малых углах деформации наблюдается горизонтальные участки действительного сдвига частоты G' (кривая 1), что свидетельствует о пропорциональности упругого напряжения к величине сдвиговой деформации (гуковская область).

Нарушение пропорциональности упругого напряжения не зависит от толщины жидкой прослойки и происходит при одном и том же угле деформации φ_k . Характерной чертой зависимости G' от $(A/H)^{1/2}$ является то, что граница линейной упругости выражена достаточно резко, зависимость имеет точку перегиба, которая соответствует определенному углу сдвиговой деформации.

Можно предположить, что жидкость обладает развитой кластерной структурой со сравнительно большим периодом релаксации и конечной прочностью. При ма-

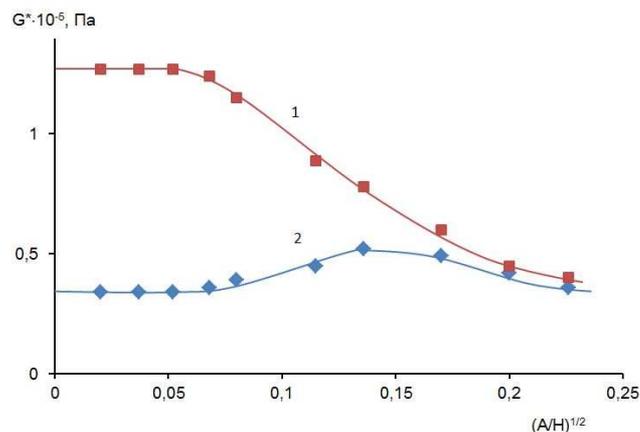


Рис. 2: Зависимости действительного G' (1) и мнимого модуля сдвига G'' (2) триэтиленгликоля от угла сдвиговой деформации $(A/H)^{1/2}$, где A — амплитуда колебания пьезокварца

лых углах сдвиговой деформации структура жидкости остается неизменной, и мы обнаруживаем область линейной упругости, в которой выполняется закон Гука. При некотором критическом напряжении сдвига P_k , равновесная структура (кластер) начинает разрушаться, поэтому действительный модуль сдвига уменьшается. Критическому напряжению сдвига соответствует определенный критический угол сдвига φ_k , который можно определить по данным рис. 2. В рассматриваемом случае угол $\varphi_k = 9'$, $P_k = 3.3 \cdot 10^2$ Па. В точке перегиба скорость изменения модуля сдвига от угла деформации максимальна. По-видимому, это соответствует максимальной скорости изменения равновесной структуры. Также из рис. 2 видно, что кривая зависимости мнимого модуля сдвига G'' (кривая 2) от угла сдвиговой деформации при его малых значениях также линейна. При дальнейшем увеличении угла сдвига наблюдается ярко выраженный максимум, причем он соответствует точке перегиба на кривой зависимости действительного модуля сдвига от угла деформации. При наибольшей скорости разрушения равновесной структуры затухание колебательной системы проходит через максимум.

По данным кривой 1 можно определить изменение напряжения сдвига в прослойке жидкости при увеличении угла деформации. Эта зависимость показана на рис. 3. По оси абсцисс на данном рисунке отложены тангенсы угла сдвиговой деформации. Штриховой линией показана линейная зависимость напряжения сдвига, чтобы нагляднее увидеть нелинейность сдвиговой упругости с увеличением угла деформации.

Другим важным структурно–механическим свойством жидкостей является их вязкость. Если рассчитать по реологической модели Максвелла проявляющуюся в эксперименте эффективную вязкость триэтиленгликоля η_{eff} (2), то оказывается, что в линейной области (т. е. при малых углах деформации) вязкость на-

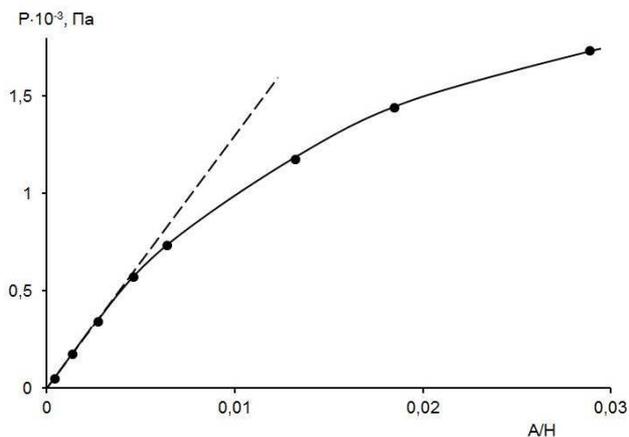


Рис. 3: Зависимость напряжения P от величины сдвиговой деформации (A/H) для триэтиленгликоля, где A — амплитуда колебания пьезокварца. Штриховая линия соответствует линейной зависимости

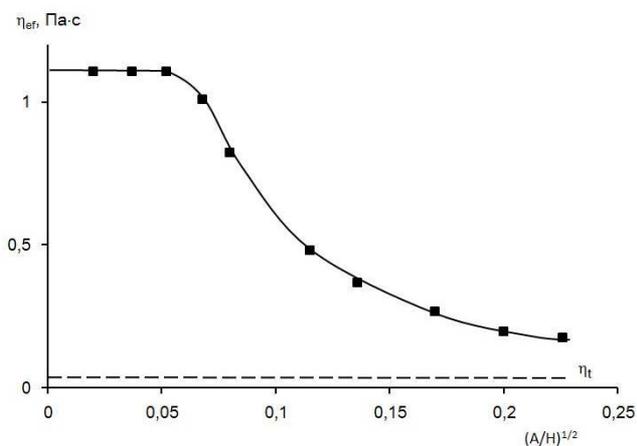


Рис. 4: Зависимость эффективной вязкости η_{eff} от величины сдвиговой деформации $(A/H)^{1/2}$ для триэтиленгликоля, где A — амплитуда колебания пьезокварца. Штриховая линия соответствует ньютоновской вязкости

много больше известной ньютоновской вязкости (таб-

личной), что соответствует практически неразрушенной структуре жидкости.

$$\eta_{eff} = \frac{G'(1 + \operatorname{tg}^2 \theta)}{\omega \operatorname{tg} \theta}. \quad (2)$$

Эффективная вязкость в этой области $\eta_{eff} = 1.10$ Па·с. По мере увеличения сдвиговой деформации эффективная вязкость уменьшается, стремясь к величине табличной вязкости η_t (рис. 4). Штриховой линией на рисунке показана табличная вязкость. Из этого предположено, что табличная вязкость характеризует жидкость с полностью разрушенной пространственной структурой, соответствующей ламинарному течению в обычных вискозиметрах. Аналогичное поведение проявляют и другие исследованные жидкости, такие как гликоли, спирты, кислоты. Поэтому возможность прямого измерения вязкости жидкости с неразрушенной равновесной структурой представляет большой интерес.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования низкочастотной (10^5 Гц) сдвиговой упругости жидкостей в зависимости от угла сдвиговой деформации на примере триэтиленгликоля показали, что жидкости в состоянии покоя обладают упорядоченной структурой. При малых углах сдвига наблюдается область линейной комплексной упругости, т.е. выполняется обобщенный закон Гука. При увеличении угла сдвига структура жидкости начинает разрушаться, что ведет к уменьшению модуля упругости. Показано, что эффективная вязкость жидкости с равновесной структурой, т.е. при малых углах сдвига, на много порядков превышает табличное значение. При увеличении угла сдвига вязкость стремится к табличному значению.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН и частично поддержана грантами РФФИ, проекты № 15-42-04319-р_сибирь_a, № 16-32-00599-мол_a, № 15-02-08204_a.

[1] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ДАН СССР. 1965. **160**, № 4. С. 799.
 [2] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ЖЭТФ. 1966. **51**, Вып. 4. С. 969.
 [3] Бадмаев Б.Б., Занданова К.Т., Будаев О.Р., Дерягин Б.В., Базарон У.Б. ДАН СССР. 1980. **254**, № 2. С. 381.
 [4] Badmaev B.B., Dembelova T.S., Damdinov B.B. Advances in Colloid and Interface Science. 2003. **104**, № 1–3. P. 299.
 [5] Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Акуст. журн. 1999. **45**, № 5. С. 610.

[6] Badmaev B.B., Dembelova T.S., Budaev O.R., Damdinov B.B. Ultrasonics. 2006. **44**. P. 1491.
 [7] Бадмаев Б.Б., Дембелова Т.С., Дамдинов Б.Б. Вязкоупругие свойства полимерных жидкостей. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013.
 [8] Апакашев Р.А., Павлов В.В. Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1997. № 1. С. 3.
 [9] Стебновский С.В. ЖТФ. 2004. **74**, Вып. 1. С. 21.
 [10] Бадмаев Б.Б., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С. Изв. РАН. Серия физическая. 2015. **79**, № 10. С. 1461.

Acoustic study of nonlinear viscoelastic properties of liquids

B. B. Badmaev^{1,a}, T. S. Dembelova^{1,b}, B. B. Damdinov^{2,c}, D. N. Makarova^{1,d}, Ye. D. Namdakova^{1,a}

¹*Institute of Physical Materials Science of RAS (Siberian Branch). Ulan-Ude 670047, Russia*

²*Buryat State University. Ulan-Ude 670000, Russia*

E-mail: ^almf@ipms.bscnet.ru, ^btu_dembel@mail.ru, ^cdababa@mail.ru ^ddagzama@mail.ru

In this paper we present the experimental results of studying the complex shear modulus and the effective viscosity from the shear strain angle for the example of triethylene glycol using the acoustic resonance method.

PACS: 62.10.+s

Keywords: shear modulus, suspension of nanoparticles, tangent of mechanical losses angle, viscosity.

Received 11 July 2017.

Сведения об авторах

1. Бадмаев Бадма Банзаракцаевич — доктор техн. наук, зав. лабораторией, доцент; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.
2. Дембелова Туяна Сергеевна — доктор техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: tu_dembel@mail.ru.
3. Дамдинов Баир Батуевич — доктор физ.-мат. наук, декан факультета, доцент; e-mail: dababa@mail.ru.
4. Макарова Дагзама Николаевна — науч. сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: dagzama@mail.ru.
5. Намдакова Евгения Доржиевна — аспирант; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.