

Научная статья
УДК 532.135:534.21
DOI 10.18101/2306-2363-2022-2-3-37-43

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СДВИГОВОЙ УПРУГОСТИ ПОЛИМЕТИЛСИЛОКСАНОВОЙ ЖИДКОСТИ

© **Машанов А. Н.**

аспирант,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
lmf@ipms.bscnet.ru;

© **Дембелова Т. С.**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
tu_dembel@mail.ru;
заведующий лабораторией
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а
dembelovats@bsu.ru

Аннотация. По существующим теориям жидкостей сдвиговая упругость должна проявляться при высоких мегагерцовых частотах. В лаборатории была обнаружена низкочастотная упругость. В работе проведено исследование низкочастотной сдвиговой упругости полиметилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом с применением пьезокварцевого резонатора. Определены модуль сдвиговой упругости, эффективная вязкость и тангенс угла механических потерь при частоте сдвиговых колебаний 73 кГц.

Ключевые слова: резонансный метод, жидкость, вязкоупругие свойства, сдвиговая упругость, релаксация, резонансная частота, затухание

Для цитирования: *Машанов А. Н., Дембелова Т. С. Исследование низкочастотной сдвиговой упругости полиметилсилоксановой жидкости // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2022. Вып. 2–3. С. 37–43.*

Введение

Полисилоксаны имеют широкий диапазон рабочих температур, их применяют как гидравлические и диффузионные жидкости, в качестве теплоносителей и жидких диэлектриков [1]. Они могут применяться в качестве приборных масел, смазок, полирующих средств; добавок к лакам и краскам; а также в качестве базовой жидкости для суспензий [2–6]. Поэтому изучение вязкоупругих свойств таких жидкостей имеет большую актуальность.

В работе проведено экспериментальное определение комплексного модуля сдвига полиметилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом.

Полиметилсилоксаны представляют собой полимер линейной структуры $(\text{CH}_3)_3\text{Si}-\text{O}-[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, где $n = 0 - 2000$. Эти полимеры обладают малыми значениями сил межмолекулярного взаимодействия, что проявляется в механических свойствах силоксановых эластомеров и полимерных пленок, особенно в их невысокой прочности на разрыв. Из-за особенностей строения полиметилсилоксаны имеют отличные низкотемпературные свойства.

Метод

Исследование вязкоупругих свойств полиметилсилоксановой жидкости ПМС-5 проведено акустическим резонансным методом, основанным на изучении влияния сил добавочной связи, осуществляемой прослойкой жидкости, на резонансные характеристики колебательной системы. Жидкость помещается на один конец пьезокварца, совершающего тангенциальные колебания, и накрывается покоящейся твердой накладкой. В теории метода [7-9] показано, что сдвиг резонансной частоты пьезокварца должен быть пропорционален обратной величине толщины прослойки жидкости H при условии, что H намного меньше длины сдвиговой волны λ ($H \ll \lambda$), установившейся в жидкости. Тогда комплексный модуль сдвига будет определяться следующей формулой:

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

где $G^* = G' + iG''$ — комплексный модуль сдвига жидкости, S — площадь основания накладки, H — толщина жидкой прослойки, M — масса пьезокварца, f_o — его резонансная частота, $\Delta f^* = \Delta f' + i\Delta f''$ — комплексный сдвиг резонансной частоты пьезокварца. Тангенс угла механических потерь выражается так:

$$\text{tg}\theta = G''/G' = \Delta f''/\Delta f'. \quad (2)$$

Таким образом, измерив действительный и мнимый сдвиги резонансной частоты, можно определить вязкоупругие характеристики жидкости. В работе использован пьезокварц X-18.5° среза с основной резонансной частотой 73,2 кГц, массой 6,82 г; площадь основания накладки 0,2 см². Для улучшения смачиваемости жидкостью поверхности пьезокварца и накладки подвергались комплексной очистке [8].

Экспериментальные результаты и обсуждение

В работах [9-12] было проведено исследование нелинейных свойств сдвиговой упругости разных жидкостей на основе анализа изменений резонансных кривых колебательной системы пьезокварца — прослойка жидкости — накладка по мере увеличения амплитуды колебания пьезокварца. При увеличении амплитуды колебания пьезокварца резонансные кривые колебательной системы деформируются. Определение амплитуды колебания пьезокварца A проведено методом, основанным на принципе интерферометра Фабри-Перо, где в качестве одного из зеркал используется оптически полированная торцевая сторона пьезокварца [9]. Отношение A/H может служить мерой угловой деформации.

В данной работе использован этот же метод определения амплитуды колебания пьезокварца. На рис. 1 показаны приведенные резонансные кривые для свободного пьезокварца (кривая 1) и с прослойкой жидкости ПМС-5 толщиной $H = 2,53$ мкм (кривая 2) с максимальной амплитудой колебаний 10 \AA . Из рис. 1 видно, что резонансная частота нагруженного кварца больше, чем свободного, и происходит уширение резонансной кривой. Обе кривые почти симметричны.

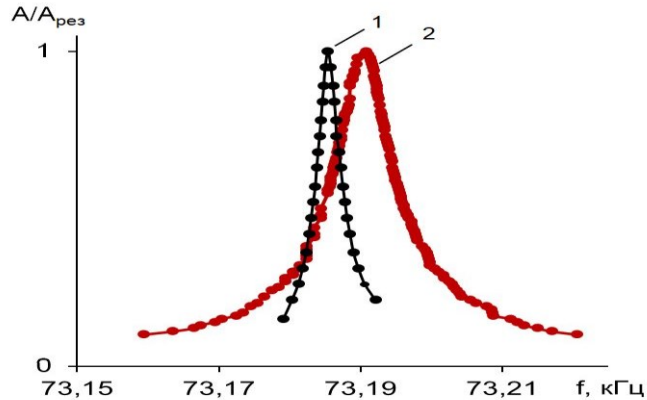


Рис. 1. Резонансные кривые свободного (1) пьезокварца и нагруженного (2) жидкостью ПМС-5 ($H = 2.53 \text{ мкм}$)

С увеличением амплитуды колебания пьезокварца до 85 \AA резонансная кривая деформируется и становится асимметричной (рис. 2), что свидетельствует о проявлении нелинейных свойств сдвиговой упругости. Поэтому изменение комплексного модуля сдвига жидкости ПМС-5 в данной работе проводилось при малых амплитудах деформации.

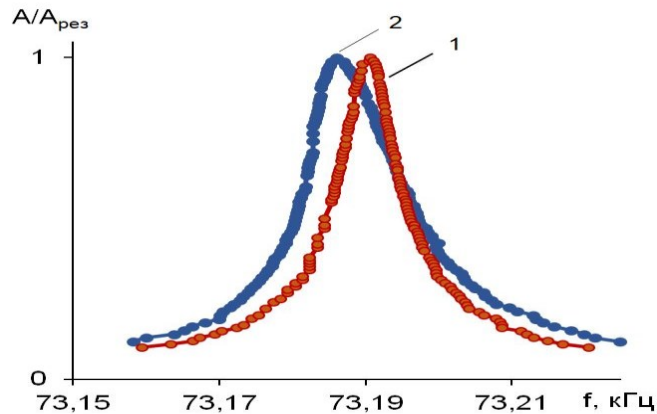


Рис. 2. Резонансные кривые при различных величинах вынуждающей силы с максимальной амплитудой колебания: 1 — 10 \AA ; 2 — 85 \AA

Экспериментальные зависимости сдвигов резонансной частоты от обратной величины толщины прослойки оказались линейными (рис. 3), что подтверждает наличие измеримого модуля сдвига. В Таблице 1 приведены рассчитанные значения модуля сдвига и тангенса угла механических потерь полимерной жидкости ПМС-5 по формулам (1) и (2).

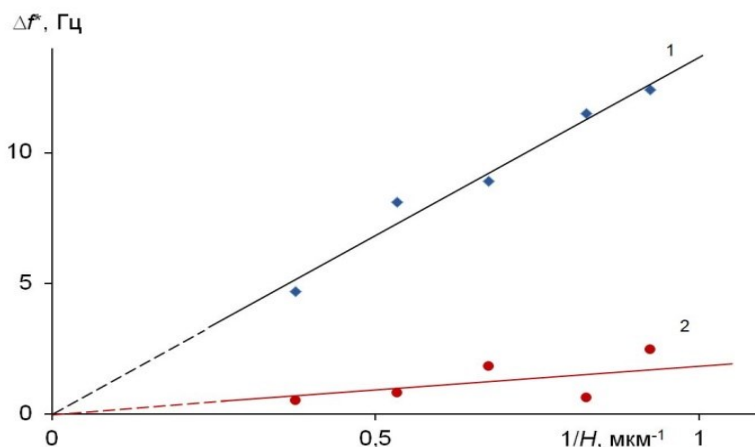


Рис. 3. Экспериментальные зависимости действительного $\Delta f'$ (1) и мнимого $\Delta f''$ (2) сдвига резонансной частоты от обратной величины толщины прослойки жидкости $1/H$

Механизм вязкоупругой релаксации в ПМС-5 можно описать реологической моделью Максвелла. Согласно модели эффективная вязкость жидкости определяется следующей формулой:

$$\eta_M = \frac{G'(1 + \text{tg}^2\theta)}{2\pi f_o \text{tg}\theta} \quad (3)$$

В таблице приведены значения коэффициента вязкости η полиметилсилоксановой жидкости ПМС-5 и эффективной вязкости η_M , проявляющейся при эксперименте, которая рассчитана по модели Максвелла. Как видно из таблицы, она существенно превышает значение известной в литературе табличной вязкости η .

Таблица 1

Экспериментальные результаты исследования
вязкоупругих параметров полиметилсилоксановой жидкости

Жидкость	t, °C	$G' \cdot 10^{-4}$, Па	tg θ	η , мПа·с	η_M , Па·с	$f_{\text{рел}}$, кГц
ПМС-5	23	1,35	0,13	4,6	0,23	9,5

Необходимо учитывать, что простая механическая модель Максвелла с одним временем релаксации лишь приближенно описывает вязкоупругое поведение реальных жидкостей. Тем не менее, можно оценить время релаксации, рассматривая ее как величину, обратную частоте релаксации, которой соответствует максимум механических потерь. В рамках модели характерная частота релаксационного процесса определяется по формуле $f_{\text{рел}} = f_o \text{tg}\theta$, и для исследуемой жидкости равна 9,5 кГц. Это означает, что в жидкости ПМС-5 наблюдается низкочастотный вязкоупругий релаксационный процесс с аномально большими значениями периода релаксации и эффективной вязкости.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что наряду с высокочастотным релаксационным процессом (10^{10} Гц), которая объясняется характером диффузионной подвижности отдельных частиц в жидкостях, имеет место низкочастотная вязкоупругая релаксация, впервые обнаруженная в работах [13, 14]. В настоящее время развивается кластерная модель жидкости, согласно которой низкочастотная вязкоупругая релаксация жидкостей обусловлена коллективным взаимодействием больших групп молекул [15-17]. Согласно этой модели в жидкостях и аморфных веществах имеются флуктуационные динамические структурные микронеоднородности — кластеры, которые с течением времени образуются и распадаются. Для определения значений основных параметров кластерной модели необходимо исследование низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей в широком интервале температур и частот.

Заключение

Проведенное в работе исследование вязкоупругих свойств полиметилсилоксановой жидкости акустическим резонансным методом при малых амплитудах сдвиговых колебаний с частотой 73 кГц показало, что ПМС-5 обладает измеримым модулем сдвига и имеет повышенное значение эффективной вязкости. Время релаксации наблюдаемого вязкоупругого релаксационного процесса намного превышает время оседлой жизни отдельных частиц жидкости.

Полученные экспериментальные данные о вязкоупругих свойствах полиметилсилоксановой жидкости имеют большое практическое значение, обусловленное широким применением полисилоксанов в различных областях современной техники.

Литература

1. Соболевский М. В., Музовская О. А., Попелева Г. С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов / под общей ред. проф. М. В. Соболевского. Москва: Химия, 1975. 296 с. Текст: непосредственный.
2. Zolper T., Li Z., Chen C., Jungk M., Marks T., Chung Y.-W., Wang Q. Lubrication properties of polyalphaolefin and polysiloxane lubricants: Molecular structure-tribology relationships // *Tribology Letters*. 2012. V. 48. P. 355–365.
3. Zhiheng W., Dehua T., Xuejin S., Xiaoyang C. Study on a new type of lubricating oil for miniature bearing operating at ultra-low temperature // *China Petroleum Processing and Petrochemical Technology*. 2018. V. 20. P. 93–100.
4. Niu R., Gong J., Xu D., Tang T., Sun Z.-Y. Rheological properties of ginger-like amorphous carbon filled silicon oil suspensions // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2014. V 444. P. 120–128.
5. Дембелова Т. С., Цыренжапова А. Б., Макарова Д. Н., Дамдинов Б. Б., Бадмаев Б. Б. Акустическое исследование сдвиговых вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2014. № 5. С. 145301. Текст: непосредственный.
6. Damdinov B. B., Dembelova T. S., Badmaev B. B., Tsyrenzhapova A. B., Makarova D.N., Pestryakov A. Study of shear properties of nanoparticle suspensions // *Procedia Chemistry*. 2014. V. 10. P. 2–6.
7. Бадмаев Б. Б., Дембелова Т. С., Дамдинов Б. Б. Вязкоупругие свойства полимерных жидкостей. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 190 с. Текст: непосредственный.
8. 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.

9. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Занданова К. Т., Ламажапова Х. Д. Нелинейные свойства сдвиговой упругости жидкостей // Журнал физической химии. 1981. Т. 55, № 11. С. 2812–2816. Текст: непосредственный.
10. Бадмаев Б. Б., Дембелова Т. С., Макарова Д. Н., Гулгенов Ч. Ж. Сдвиговая упругость и прочность структуры жидкости на примере диэтиленгликоля // Журнал технической физики. 2017. Т. 87, Вып. 1. С. 18–21. Текст: непосредственный.
11. Dembelova T. S., Badmaev B. B., Makarova D. N., Vershinina Ye. D. Nonlinear viscoelastic properties of nanosuspensions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 704. P. 012005.
12. Dembelova T. S., Makarova D. N., Badmaev B. B. Studying the Shear Elasticity Nonlinearity of Nanosuspensions by Acoustic Means // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V. 85, № 6. P. 653–657.
13. Базарон У. Б., Дерягин Б. В., Булгадаев А. В. О сдвиговой упругости граничных слоев жидкостей // Доклады АН СССР. 1965. Т. 160. № 4. С. 799–803. Текст: непосредственный.
14. 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. С. 969–981. Текст: непосредственный.
15. Сандитов Д. С. Дырочно-кластерная модель низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей // Доклады СО АН высшей школы. 2001. № 2 (4). С. 38–44. Текст: непосредственный.
16. Бадмаев Б. Б., Дамдинов Б., Дембелова Т. С. Вязкоупругая релаксация в жидкостях // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 10. С. 1461–1466. Текст: непосредственный.
17. Дембелова Т. С., Сандитов Д. С. Низкочастотная вязкоупругая релаксация в полимерных жидкостях // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2022. № 1. С. 24–31. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 9.09.2022; одобрена после рецензирования 14.10.2022; принята к публикации 17.10.2022

STUDY OF LOW-FREQUENCY SHEAR ELASTICITY OF POLYMETHYLSILOXANE LIQUID

Mashanov A. N.
Postgraduate
Institute of Physical Materials Science SB RAS
670047 Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6
lmf@ipms.bscnet.ru

Dembelova T. S.
Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
Institute of Physical Materials Science SB RAS
670047 Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6
tu_dembel@mail.ru;
Head of Laboratory
Buryat State University
670000 Ulan-Ude, Smolin Str., 24a
dembelovats@bsu.ru

Abstract. Annotation. According to the existing theories of liquids, shear elasticity should manifest itself at high megahertz frequencies. Low-frequency elasticity was detected in the laboratory. The study of the low-frequency shear elasticity of a polymethylsiloxane liquid by an acoustic resonance method using a piezoquartz resonator is carried out. The modulus of shear elasticity, effective viscosity and the tangent of the angle of mechanical losses at a frequency of shear vibrations of 73 kHz are determined.

Keywords: resonant method, liquid, viscoelastic properties, shear elasticity, relaxation, resonant frequency, attenuation

For Citation

Mashanov A. N., Dembelova T. S. Study of low-frequency shear elasticity of polymethylsiloxane liquid // Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics. 2022; 2–3:37–43 (In Russ.)

The article was submitted 9/09/2022; approved after reviewing 14/10/2022; accepted for publication 17/10/2022