

Акустическое исследование сдвиговых вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц

Т.С. Дембелова^{1,*}, А.Б. Цыренжапова¹, Д.Н. Макарова¹, Б.Б. Дамдинов², Б.Б. Бадмаев^{1†}

¹Институт физического материаловедения СО РАН,

лаборатория физики молекулярных структур, Россия, 670047, Улан-Удэ, ул.Сахьяновой, 6

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

(Статья поступила 16.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Акустическим резонансным методом измерен комплексный модуль сдвига коллоидных суспензий наночастиц диоксида кремния в полимерной жидкости ПЭС-2 в зависимости от угла сдвиговой деформации. Для исследования в качестве вибратора применен пьезокварцевый кристалл с резонансной частотой 73 кГц. Показано изменение вязкоупругих свойств суспензий по сравнению с базовой жидкостью в зависимости от концентрации и размеров наночастиц.

PACS: 62.10.+s; 64.70.pv; 83.80.Hj УДК: 532.135

Ключевые слова: модуль сдвига, суспензии наночастиц, тангенс угла механических потерь, вязкость.

Акустическим резонансным методом с применением пьезокварцевого резонатора измерены низкочастотные комплексные модули сдвига коллоидных суспензий наночастиц. Акустический резонансный метод [1–3] основан на изучении влияния сил добавочной связи, осуществляемой прослойкой жидкости, на резонансные характеристики колебательной системы. Пьезокварцевый кристалл, колеблющийся на основной резонансной частоте, контактирует своей горизонтальной поверхностью, совершающей тангенциальные смещения, с прослойкой жидкости, накрытой твердой накладкой, расположенной на одном конце. При этом прослойка жидкости испытывает деформации сдвига и в ней устанавливаются стоячие сдвиговые волны. Согласно теории метода исследования сдвиг резонансной частоты пьезокварца Δf^* должен быть пропорционален обратной величине толщины прослойки жидкости считая, что накладка практически покоится вследствие слабого воздействия на нее со стороны жидкости и что толщина прослойки много меньше длины волны в жидкости. Тогда комплексный модуль сдвига G^* и тангенс угла механических потерь $\operatorname{tg} \theta$ будут определяться выражением: [3]

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

где $G^* = G' + iG''$ — комплексный модуль сдвига жидкости, $\Delta f^* = \Delta f' + i\Delta f''$ — комплексный сдвиг резонансной частоты, M — масса пьезокварца, S — площадь основания накладки, f_0 — резонансная частота пьезокварца, H — толщина прослойки жидкости. Мнимый сдвиг частоты $\Delta f''$ равен половине изменения ширины резонансной кривой. В эксперименте измеряются толщина прослойки жидкости H и сдвиги резонансной

частоты. По формулам (1) вычисляются основные вязкоупругие параметры жидкостей. В эксперименте применялся пьезокварц X-18,5° среза с резонансной частотой 73,2 кГц, с массой 6.24 г, площадь основания накладки составляла 0,2 см².

Измерены действительный и мнимый модули сдвига коллоидных суспензий наночастиц SiO₂ в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-2. Коллоидные суспензии получены с использованием ультразвукового прибора Sonoswiss модели SW 1Н. Результаты исследования суспензий наночастиц резонансным методом показали линейную зависимость действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины жидкой прослойки, что свидетельствует о наличии у данных жидкостей объемного модуля сдвига, т. е. не зависящего от толщины прослойки жидкости (рис. 1). Исследования показали, что с увеличением концентрации наночастиц модуль сдвига уменьшается (рис. 2), при этом увеличение размеров нановключений при одинаковой концентрации дает повышение G' . Полученные значения динамического модуля сдвига и тангенса угла механических потерь для коллоидных суспензий наночастиц SiO₂ с размерами 100, 50 и 20 нм с массовой долей 0,5% в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-2 представлены в табл. 1.

Таблица 1: Экспериментальные результаты исследования вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц SiO₂/ПЭС-2

SiO ₂ /ПЭС-2	$G' \times 10^{-5}$, Па	$\operatorname{tg} \theta$	$f_{\text{рел.}}$, кГц
20 нм	0,09	0,73	53,43
50 нм	0,17	0,18	13,17
100 нм	1,08	0,1	7,32

Как видно из таблицы с увеличением размеров наночастиц наблюдается увеличение модуля сдвига, при этом $\operatorname{tg} \theta$ меньше единицы для всех исследованных

*E-mail: lmf@ipms.bsnet.ru; E-mail: tu_dembel@mail.ru

†E-mail: dababa@mail.ru

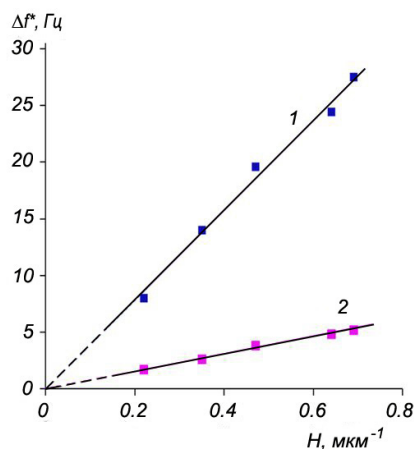


Рис. 1: Зависимость действительного (1) и мнимого (2) сдвигов частот от обратной толщины прослойки для суспензии $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$ (0,5%) с размером наночастиц 50 нм

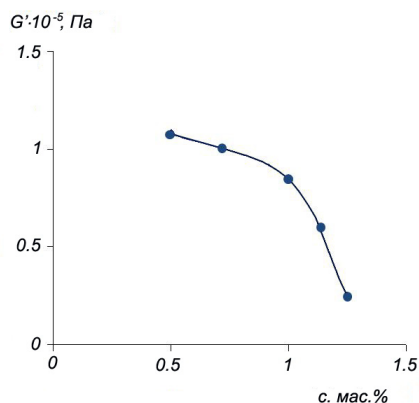


Рис. 2: Динамический модуль упругости коллоидных суспензий наночастиц SiO_2 с размером 100 нм в ПЭС-2 в зависимости от концентрации

жидкостей. Если предположить, что механизм данной вязкоупругой релаксации может описываться реологической моделью Максвелла, то частота релаксационного процесса должна быть меньше частоты эксперимента $f_{\text{рел}} = f_0 \text{tg } \theta$.

Ценную информацию о структуре и процессах ее перестройки могут дать исследования вязкоупругих свойств суспензий в зависимости от величины сдвиговой деформации. Измерение абсолютных значений амплитуд колебаний кварца было проведено методом, основанным на принципе интерферометра Фабри-Перо [4]. Угол сдвиговой деформации при малых значениях деформации пропорционален отношению амплитуды колебания пьезокварца A

к толщине прослойки жидкости H и может являться мерой угловой деформации. Однако для удобства анализа экспериментальные результаты представлены в зависимости от $\sqrt{A/H}$.

На рис. 3 представлены зависимости действительного (1) и мнимого (2) сдвигов резонансной частоты от угла сдвиговой деформации для суспензии наночастиц диоксида кремния с массовой долей 1,25% в полиэтилсилоксановой жидкости ПЭС-2 с размерами наночастиц 50 нм и 100 нм. Как видно, при малых углах деформации сдвиги частот постоянны (область линейной упругости), далее с увеличением угла сдвига действительный сдвиг частоты уменьшается, а мнимый начинает увеличиваться, т.е. при увеличении угла деформации, или скорости деформации затухание увеличивается. Определено изменение тангенса угла механических потерь в зависимости от угла сдвиговой деформации для суспензий $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c = 1,25$ мас. %.

Из рис. 4 видно, что $\text{tg } \theta$ возрастает с увеличением угла деформации.

Эффективная вязкость этих суспензий, рассчитанная по реологической модели Максвелла в зависимости от величины угла сдвиговой деформации имеет повышенное значение при малых углах сдвиговой деформации и с увеличением угла сдвиговой деформации уменьшается (рис. 5). Таким образом, при равновесной структуре эффективная вязкость может иметь аномально высокое значение.

В области линейной упругости структура суспензии остается неразрушенной, а изменение ее механических свойств по мере увеличения сдвиговой деформации происходит за счет разрушения равновесной структуры. Характерный критический угол для суспензии наночастиц с размером 100 нм $\varphi_k = 1^\circ$, с уменьшением размера наночастиц критический угол увеличивается, так для второй суспензии $\varphi_k = 3,6^\circ$, что намного превышает критический угол для базовой жидкости ПЭС-2. Это свидетельствует о более прочной структуре суспензии на основе полиэтилсилоксановой жидкости. Полученный результат особенно важен, поскольку полиорганосилоксаны обладают невысокой механической прочностью по сравнению с традиционными органическими полимерами [5]. Использование в качестве смазочных масел ПЭС жидкостей с наночастицами диоксида кремния могут значительно улучшить их трибологические характеристики путем увеличения прочности смазочной пленки и улучшения смазочных свойств, возрастающих с уменьшением размеров частиц, т.е. с увеличением удельной поверхности, что приводит к возрастанию адгезионной активности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №12-02-98012-р_сибирь_a, №12-02-98003-р_сибирь_a).

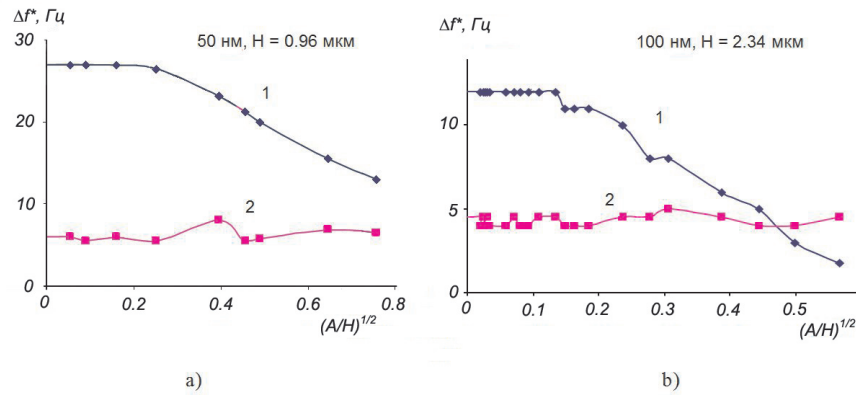


Рис. 3: Зависимости действительного (1) и мнимого (2) сдвигов резонансной частоты от угла сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1,25 \text{ мас.}\%$

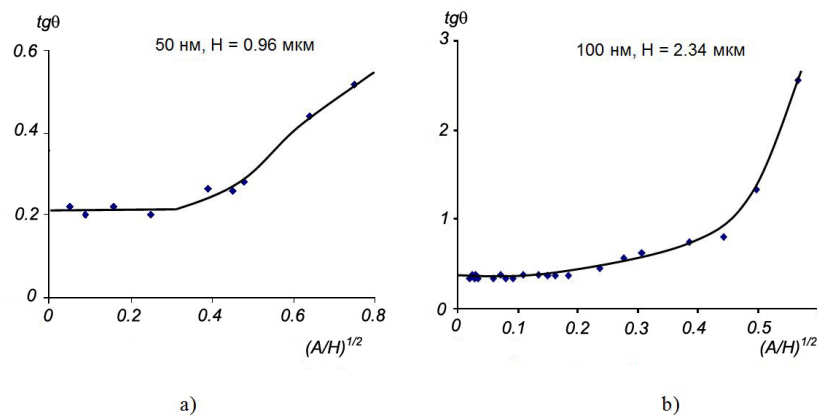


Рис. 4: Зависимость тангенса угла механических потерь $\text{tg}\theta$ от угловой сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1,25 \text{ мас.}\%$

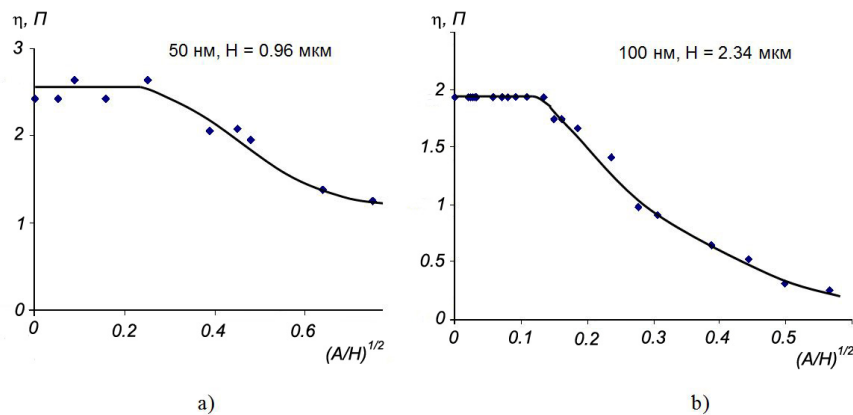


Рис. 5: Зависимость эффективной вязкости от угла сдвиговой деформации для суспензий наночастиц $\text{SiO}_2/\text{ПЭС-2}$, $c=1,25 \text{ мас.}\%$

- [1] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ЖЭТФ. **51**. Вып. 4(10). С. 969. (1966).
- [2] Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Акуст. журн. **45**, № 5. С. 610. (1999).
- [3] Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов С.А., Дембелова Т.С. Акуст. журн. 2010. **56**, № 5. С. 602. (2010).
- [4] Базарон У.Б. Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей. (Улан-Удэ: Издательство Бурятского научного центра СО РАН, 2000). 165 с.
- [5] Васильев В.Г. Автореферат дис. докт. хим. наук: 02.00.06 [Электронный ресурс] Режим доступа. URL: <http://www.dissercat.com/content/spetsificheskie-vzaimodeistviya-i-osobennosti-geologicheskikh-svoistv-siloksanov> (дата обращения 16.02.2012).

The acoustical investigation of shear viscoelastic properties of colloidal suspensions of nanoparticles

T.S. Dembelova^{1,a}, A.B. Tsyrenzhapova^{1,a}, D.N. Makarova^{1,a}, B.B. Damdinov^{2,b}, B.B. Badmaev^{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, ^atu_dembel@mail.ru, ^bdababa@mail.ru

A complex shear modulus of colloidal suspensions of silica nanoparticles in the liquid polymer PES-2 are measured depending on the angle of shear deformation using acoustical resonance method. A piezoelectric crystal with the resonance frequency of 73 kHz as vibrator is applied in study. The changing of the viscoelastic properties of the suspensions depending on the concentration and size of nanoparticles is shown according to the comparison with the base liquid.

PACS: 62.10.+s; 64.70.pv; 83.80.Hj

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

Received 16.11.2014.

Сведения об авторах

1. Дембелова Туяна Сергеевна — докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru, tu_dembel@mail.ru.
2. Цыренжапова Антонина Батоевна — младший научный сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.
3. Макарова Дагзана Николаевна — научный сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: dagzama@mail.ru.
4. Дамдинов Баир Батуевич — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, доцент; e-mail: dababa@mail.ru.
5. Бадмаев Бадма Банзаракцаевич — докт. техн. наук, заведующий лабораторией, доцент; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.