

етных, гравитационных и капиллярных сил определится модифицированным безразмерным гравитационным числом. Аналитическое решение и численное моделирование при выполнении ряда условий показали существенное влияние гравитационных сил на поведение системы.

Литература

1. Чарный И.А. Подземная гидродинамика. – М.: Недра, 1963. – 313 с.
2. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – М.: Недра, 1982. – 116 с.
3. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации. – М.: Недра, 1972. – 128 с.

Кондратьева Найля Рашитовна, научный сотрудник, ООО «РН-УфаНИПИнефть». Уфа, тел. 89872502482, e-mail: nelka_02@mail.ru

Kondratyeva Naylya Rashitovna, researcher, «RN-UfaNIPIneft». Ufa, tel. 89872502482

УДК 532.135

ИЗМЕРЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ (10^5 Гц) ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ КОЛЛОИДНЫХ СУСПЕНЗИЙ НАНОЧАСТИЦ Nd:YAG В ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕ

Т.С. Дембелова, А.Б. Цыренжапова, А.А. Цыремжитова

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 09-02-00748-а.

Акустическим резонансным методом, с применением пьезокварцевого резонатора впервые измерены низкочастотные комплексные модули сдвига коллоидных суспензий наночастиц. Установлена зависимость вязкоупругих характеристик коллоидных суспензий от размеров наночастиц и их концентрации.

Ключевые слова: модуль сдвига, тангенс угла механических потерь, частота релаксации, эффективная вязкость, коллоидные суспензии, наночастицы, концентрация.

MEASUREMENT OF LOW-FREQUENCY (10^5 Hz) VISCOELASTIC PROPERTIES OF Nd:YAG NANOPARTICLES COLLOIDAL SUSPENSIONS IN ETHYLENE GLYCOL

T.S. Dembelova, A.B. Tsyrenzhapova, A.A. Tsyremzhitova

The low-frequency complex shear moduli of nanoparticles colloidal suspensions were measured by acoustic resonant method with application of piezoquartz vibrator. Dependence of viscoelastic properties of colloidal suspensions from nanoparticles sizes and their concentration is established.

Keywords: shear module, tangent of mechanical loss angle, relaxation frequency, effective viscosity, colloidal suspensions, nanoparticles, concentration.

В работах [1-2] акустическим резонансным методом впервые была обнаружена низкочастотная (10^5 Гц) сдвиговая упругость жидкостей. Дальнейшее всестороннее исследование данного явления в зависимости от толщины жидкой прослойки и распространения сдвиговых волн показали, что низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей является их неотъемлемым объемным свойством [3-6]. Наличие сдвиговой упругости при данных частотах показывает, что в жидкостях, наряду с высокочастотным, существует низкочастотный вязкоупругий релаксационный процесс. Резонансный метод исследования вязкоупругих свойств жидкостей имеет высокую чувствительность к неоднородностям структуры исследуемых объектов и вполне применима для исследования вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц.

В данной работе был измерен комплексный модуль сдвига коллоидных суспензий наночастиц Nd:YAG (иттрий-алюминиевый гранат допированный неодимом) в этиленгликоле акустическим резонансным методом при частоте 74 кГц. Коллоидные суспензии наночастиц в этиленгликоле получены ультразвуковым методом. Были использованы 40 и 300 нм наночастицы Nd:YAG. Нанопорошок Nd:YAG получен химическим жидкостным методом [7]. В качестве растворителя использовался этиленгликоль ($C_2H_6O_2$) компании Merck (Германия) чистотой 99.5%, молярной массой $M = 62.07$ г/моль и плотностью $\rho = 1.11$ г/см³. Выбор этиленгликоля в качестве жидкой среды определялся тем, что его плотность позволяет производить эксперименты с наночастицами Nd:YAG практически без оседания последних. Суспензии были приготовлены с использованием ультразвукового прибора Sonoswiss модели SW 1H.

Акустический резонансный метод определения основан на изучении влияния сил добавочной связи, осуществляемой прослойкой жидкости, на резонансные характеристики колебательной системы. Исследуемая жидкость помещается между поверхностями колеблющегося на резонансной частоте пьезокварца и покоящейся накладкой, расположенной на одном конце. Срез пьезокварца X-18,5° обеспечивает чисто сдвиговые деформации жидкости при этом в жидкости устанавливаются стоячие сдвиговые волны. Решение задачи взаимодействия пьезорезонатора с прослойкой жидкости и твердой накладкой дает для комплексного сдвига резонансной частоты $\Delta f^* = \Delta f' + i\Delta f''$ следующее выражение [3]:

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

где $G^* = G' + iG''$ – действительный и мнимый модули сдвига жидкости, S – площадь основания накладки, H – толщина жидкой прослойки, M – масса резонатора, f_0 – его резонансная частота, $\kappa^* = \beta - i\alpha$ – комплексное волновое число, φ^* – комплексный сдвиг фазы при отражении сдвиговой волны от границы жидкость – накладка.

Считая, что накладка при колебаниях пьезокварца практически покоится вследствие слабого воздействия на нее жидкости ($\varphi^* = 0$) и толщина прослойки много меньше длины сдвиговой волны в жидкости ($H \ll \lambda$), для комплексного модуля сдвига будем иметь выражение:

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

Тангенс угла механических потерь равен $\operatorname{tg} \theta = G''/G' = \Delta f''/\Delta f'$. Из выражения (1) следует, что комплексный сдвиг резонансной частоты пьезокварца Δf^* должен быть пропорционален обратной величине толщины прослойки жидкости. Таким образом, измерив действительный и мнимый сдвиги частот, можно определить комплексный модуль упругости жидкости.

Результаты исследования суспензий наночастиц резонансным методом действительно 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. В качестве примера на рис. 1 и 2 представлены результаты измерений для суспензии 40 нм частиц 0.62% (масс.) и 300 нм частиц 0.4% (масс.) концентрации. На рисунке 3 показаны результаты измерений действительного и мнимого сдвигов частоты для суспензий наночастиц иттрий-алюминиевого граната размерами 300 и 40 нм в этиленгликоле в зависимости от их концентрации.

Как видно из рисунков, зависимость действительного и мнимого сдвигов частоты от концентрации неоднозначна. С увеличением концентрации наночастиц величина сдвига частоты возрастает, что означает и рост модуля сдвига, дальнейшее увеличение концентрации ведет к уменьшению сдвигов частоты. Такое изменение, вероятно, обусловлено тем, что наночастицы до определенной концентрации раствора ведут себя как пластификаторы, т.е. наночастицы, располагаясь между молекулами этиленгликоля, способствуют упрочнению структуры жидкости, сопровождающемуся увеличением модуля сдвига. Уменьшение модуля сдвига с определенного значения концентрации можно объяснить тем, что в данном случае наночастицы ведут себя подобно антипластификатору. Такой переход роли наночастиц в растворе подтверждается максимумом затухания системы, причем для 40 нм наночастиц максимум затухания наблюдается при большей концентрации. Рассчитанные по формуле (1) значения действительного модуля сдвига и тангенса угла механических потерь представлены в таблице.

Таблица

Вязкоупругие характеристики коллоидных суспензий наночастиц

	C, %	$G' \cdot 10^{-5}$, Па	$\operatorname{tg} \theta$	$f_{\text{рез}}$, Гц	$\eta_{\text{эф}}$, Па·с
Суспензия ND:YAG, 300 нм	0.4	0.37	0.4	29264	0.23
	0.5	1.07	0.49	35848	0.59
	0.6	1.169	0.5	36580	0.64
	0.8	0.97	0.35	25606	0.68
	1	0.49	0.47	34385	0.28
	1.2	0.38	0.71	51943	0.18
Суспензия ND:YAG, 40 нм	0.4	0.33	0.89	65112	0.14
	0.62	1.063	0.72	52675	0.49
	0.8	1.21	0.8	58528	0.54
	1	0.86	0.38	27800	0.56
	1.2	0.197	0.75	54870	0.09

В экспериментах применялся пьезокварц массой $M = 6,24$ г, размерами $34,7 \times 12 \times 5,5$ мм³, резонансная частота пьезокварца равна 73,16 кГц, а площадь основания накладки $S = 0,2$ см². Как видно из таблицы, $\text{tg} \theta$ меньше единицы для всех исследованных жидкостей. Если предположить, что механизм данной вязкоупругой релаксации может описываться реологической моделью Максвелла, то частота релаксационного процесса, определяемая по формуле $f_{\text{рел}} = f_0 \text{tg} \theta$, должна быть меньше частоты эксперимента. Эффективная вязкость рассчитана по реологической модели Максвелла по формуле $\eta_{\text{ef}} = \frac{G'(1 + \text{tg}^2 \theta)}{2\pi f_0 \text{tg} \theta}$, где f_0 – резонансная частота пьезокварца, равная 73,16 кГц. Результаты расчета

частоты релаксации и эффективной вязкости также приведены в табл.

Таким образом, экспериментальное исследование коллоидных суспензий наночастиц показало, что они обладают комплексным модулем сдвига при частоте сдвиговых колебаний порядка 10^5 Гц, зависящих как от размеров наночастиц, так и их концентрации.

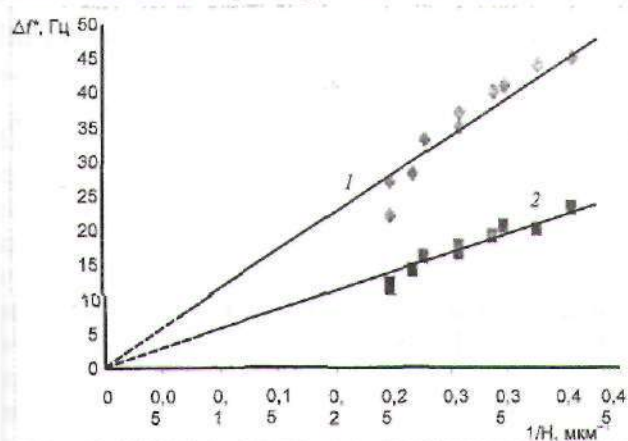


Рис. 1. Зависимости действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины жидкой прослойки, для суспензии 40 нм частиц 0,62% концентрации

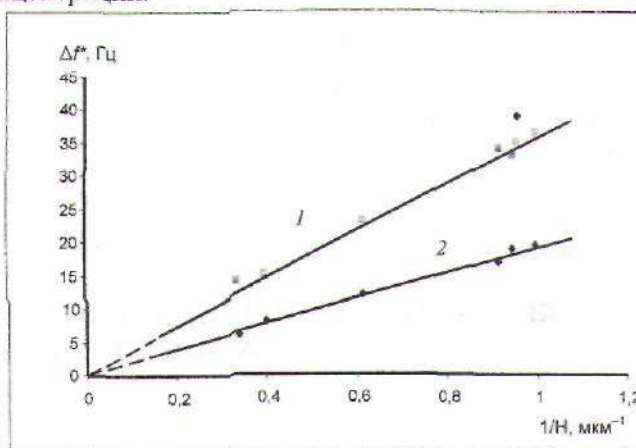


Рис. 2. Зависимости действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины жидкой прослойки, для суспензии 300 нм частиц 0,4% концентрации

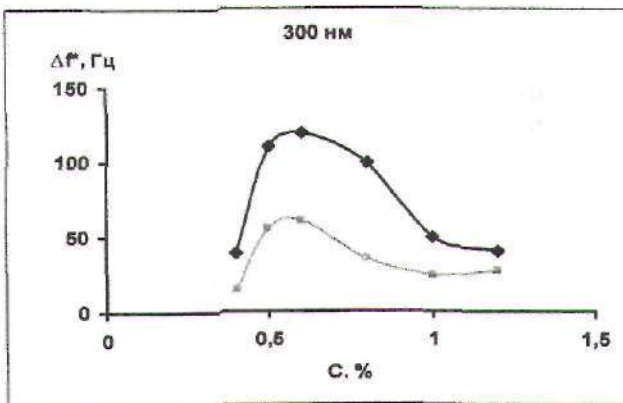
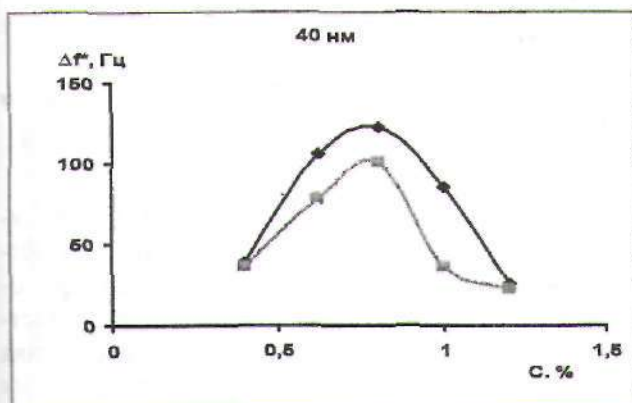


Рис. 3. Зависимости действительного (темная линия) и мнимого (светлая линия) сдвигов частот от концентрации для суспензии 40 нм и 300 нм частиц Nd:YAG

Литература

1. 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.
2. Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. О сдвиговой упругости граничных слоев жидкостей // Доклад АН СССР. – 1965. – Т.160, №4. – С. 799-803.
3. Бадмаев Б.Б., Базарон У.Б., Будаев О.Р. и др. Исследование низкочастотного комплексного модуля сдвига жидкостей // Кол. журн. – 1982. – Т.54, №5. – С. 841-846.

4. Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Будаев О.Р., Бадмаев Б.Б. Определение низкочастотного комплексного модуля вязкости жидкостей по измерениям длины сдвиговых волн // Докл. АН СССР. – 1978. – Т.238, №1. – С. 50-53.
5. Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Распространение сдвиговых волн в полимерных жидкостях // Акуст. журн. – 1999. – Т.45, №5. – С. 610-614.
6. Бадмаев Б.Б., Занданова К.Т., Будаев О.Р. и др. Низкочастотный комплексный модуль сдвига воды, этиленгликоля и триэтиленгликоля // Докл. АН СССР. – 1980. – Т.254, №2. – С. 381-385.
7. Barnakov Yu.A., Veal I., Kabato Z. and oth. Simple route to Nd:YAG transparent ceramics // Proceedings of SPIE. – 2006. – V.6216. – art. №62160Z.

Дембелова Туяна Сергеевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: lmf@pres.bsnet.ru

Цыренжапова Антониона Батоевна, аспирант, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, e-mail: lmf@pres.bsnet.ru

Цыремжитова Анжелика Александровна, аспирант, отдел физических проблем, Бурятский научный центр СО РАН. 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8

Dembelova Tuyana Sergeevna, candidate of engineering, leading researcher, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

Tsyrenzhapova Antonina Batoevna, postgraduate student, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

Tsyremzhitova Anzhelika Alexandrovna, postgraduate student, department of physical problems, Buryat Scientific Center SB RAS.

УДК 534.6 + 532.13

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И СКОРОСТИ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКА

И.Г. Симаков, Ч.Ж. Гулгенов

Разработан чувствительный метод регистрации изменения скорости и затухания поверхностных акустических волн в слоистой системе. Результаты исследования могут быть использованы для разработки чувствительных адсорбционных датчиков.

Ключевые слова: *поверхностные акустические волны, измерение скорости, измерение амплитуды, поверхностные процессы.*

REGISTRATION OF AMPLITUDE AND VELOCITY OF RAYLEIGH WAVES CHANGES ON THE PIEZOELECTRIC SURFACE

I.G. Simakov, Ch.Zh. Gulgenov

The sensitive method of registration changes of velocity and superficial ultrasonic waves signal attenuation in schistose system is developed. Results of the research can be used for adsorption data units working out.

Keywords: *surface acoustic waves, velocity measuring, amplitude measuring, surface phenomena.*

Поверхностные акустические волны (ПАВ) рэлеевского типа успешно используются для исследования различных явлений и процессов на поверхности твердого тела [1–3]. Поверхностные процессы сопровождаются уменьшением свободной энергии, изменением упругих характеристик приповерхностного слоя твердого тела, что приводит к изменению условий распространения поверхностной волны. Изменения упругих характеристик приповерхностного слоя в акустических измерениях проявляются как малые изменения амплитуды и скорости упругих поверхностных волн [4]. Поэтому рэлеевские волны могут быть использованы в качестве инструмента исследования поверхностных процессов. Для анализа особенностей поверхностных процессов необходимы чувствительные методы регистрации затухания и изменения скорости ПАВ. В настоящей работе представлен метод регистрации малых изменений амплитуды и скорости ПАВ.

Типичным поверхностным процессом является адсорбция пара полярной жидкости. Адсорбционный слой полярной жидкости формируется как результат динамического равновесия двух одновременно идущих процессов: полислойной адсорбции молекул жидкости на твердой поверхности и десорбции этих молекул с поверхности слоя [5]. Толщина слоя не превышает нескольких десятков нанометров и зависит от давления пара у поверхности твердого тела (адсорбента) и температуры адсорбирующей поверхности. Изменения упругих характеристик адсорбирующей поверхности твердо-