

УДК 532.135

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СДВИГОВЫХ ВОЛН В ПОЛИМЕРНЫХ ЖИДКОСТЯХ

© 1999 г. Б. Б. Бадмаев, О. Р. Будаев, Т. С. Дембелова

Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН

670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8

E-mail: root@bien.buriatia.su

Поступила в редакцию 19.11.98 г.

Экспериментально измерены длины низкочастотных (10^5 Гц) сдвиговых волн в полиметилсилоксановых жидкостях, по параметрам которых рассчитаны комплексные модули сдвига. Эти же вязкоупругие параметры жидкостей измерены при других условиях, когда толщина жидкой прослойки намного меньше длины сдвиговой волны. Показано удовлетворительное согласие результатов, полученных двумя методами.

Исследование сдвиговых механических свойств жидкостей является одним из прямых подходов к исследованию центральной проблемы физики жидкости – природы и характера процессов перестройки межмолекулярной структуры. Для изучения проблемы структурной релаксации жидкостей наибольший интерес имеют отклонения от ньютоновского поведения. Ранее было показано, что все жидкости, независимо от их вязкости и полярности, обнаруживают комплексную сдвиговую упругость при частотах сдвиговых колебаний порядка 10^5 Гц [1–3]. По общепринятым представлениям о природе жидкого состояния вещества это должно наблюдаться только при частотах порядка 10^{10} – 10^{12} Гц, оцениваемых по частоте перекоков частиц жидкости из временных положений равновесия [4]. Причем величина сдвиговой упругости должна иметь порядок величины сдвиговой упругости соответствующего твердого тела. Исследования низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей резонансным методом с применением пьезокварца показали, что это явление не относится к свойствам особых граничных слоев жидкости, так как нет зависимости модуля сдвига от толщины жидкой прослойки [3]. То, что обнаруженное явление является свойством жидкости в объеме, подтверждает и возможность распространения сдвиговых волн в жидкости.

Если жидкость при заданной частоте обладает сдвиговой упругостью, т.е. является вязкоупругой, то глубина проникновения сдвиговых волн δ , или расстояние, на котором амплитуда волны убывает в e раз, будет зависеть от соотношения действительного и мнимого модулей упругости, или от величины угла механических потерь $\text{tg}\theta$:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi \text{tg}\theta/2}$$

Если тангенс угла механических потерь, равный отношению мнимого модуля сдвига G'' к дей-

ствительному G' : $\text{tg}\theta = G''/G'$, окажется много меньше единицы, то глубина проникновения волны может оказаться достаточно большой, так что можно будет осуществить ультразвуковой интерферометр на сдвиговых волнах для определения вязкоупругих параметров исследуемой жидкости.

Если на горизонтальную поверхность пьезокварца, совершающего тангенциальные колебания, нанести слой вязкоупругой жидкости, равномерный по толщине, то в этом слое должны установиться стоячие сдвиговые волны. В зависимости от толщины слоя жидкости будут изменяться параметры резонансной кривой пьезокварца. Однако в эксперименте очень трудно добиться равномерности слоя жидкости по толщине из-за краевых эффектов и трудно учесть их влияние на измерения. Поэтому был осуществлен эксперимент, при котором жидкость заключалась между пьезокварцем и накладкой на его конце [1].

Если считать, что связь, осуществляемая прослойкой жидкости, достаточно мала, то при тангенциальных смещениях верхней грани пьезокварца прослойка жидкости испытывает деформации сдвига, а накладка практически покоится. При этих условиях для действительного и мнимого составляющих комплексного сдвига резонансной частоты из решения задачи пьезокварц–прослойка жидкости–накладка [3] получены следующие выражения:

$$\Delta f' = \frac{S}{4\pi^2 M f_0} \times$$

$$\times \frac{(G'\beta + G''\alpha) \sin 2\beta H + (G'\alpha - G''\beta) \text{sh } 2\alpha H}{\text{ch } 2\alpha H - \cos 2\beta H}, \quad (1)$$

$$\Delta f'' = \frac{S}{4\pi^2 M f_0} \times$$

$$\times \frac{(G''\beta - G'\alpha) \sin 2\beta H + (G''\alpha + G'\beta) \text{sh } 2\alpha H}{\text{ch } 2\alpha H - \cos 2\beta H}, \quad (2)$$

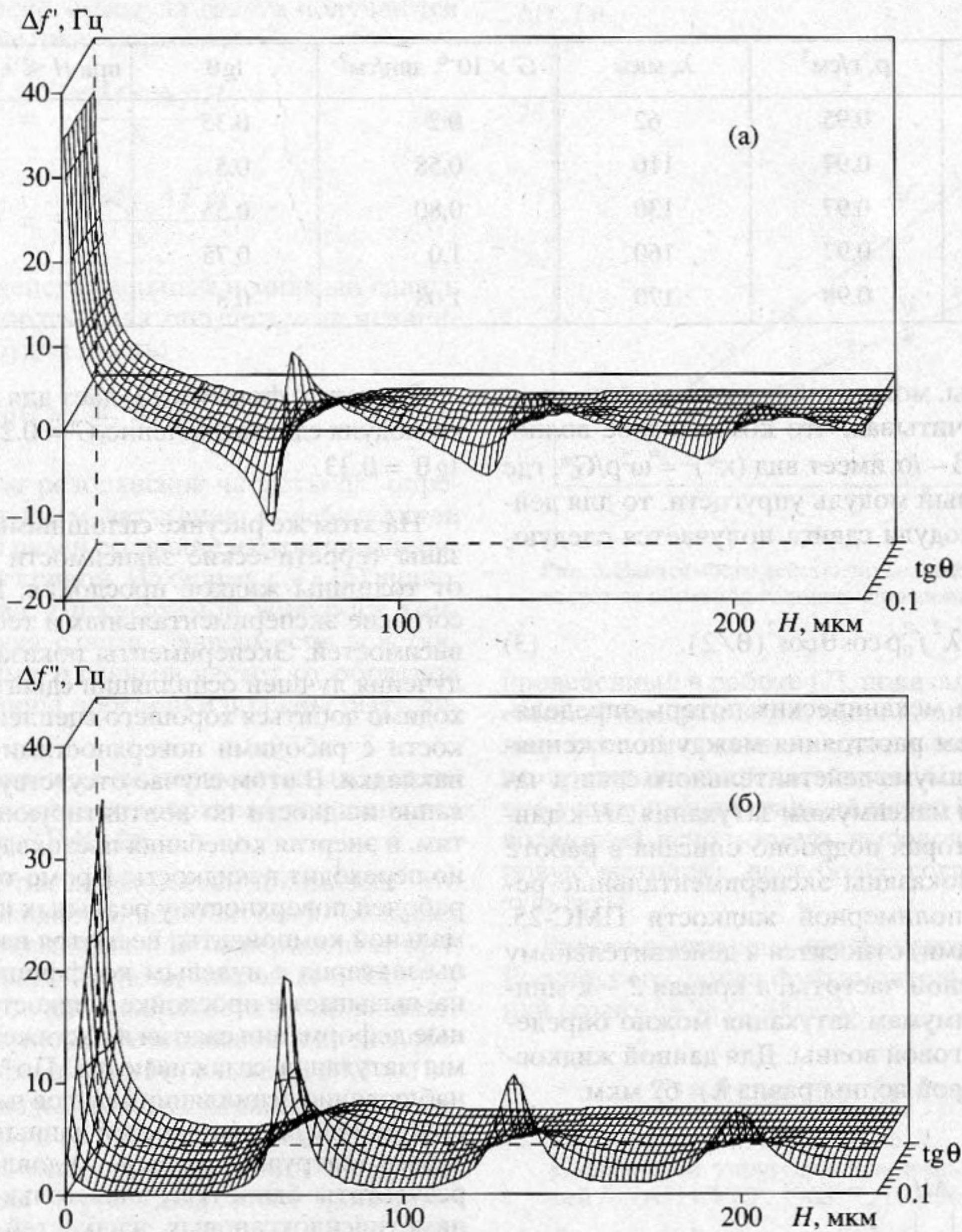


Рис. 1. Теоретические зависимости действительного $\Delta f'$ (а) и мнимого $\Delta f''$ (б) сдвигов частот от толщины прослойки для жидкостей с $G' = 10^6$ дин/см² при изменении значений $\text{tg}\theta$ с шагом 0.1.

где G' и G'' – действительный и мнимый модули сдвига жидкости, S – площадь основания наклад- ки, H – толщина жидкой прослойки, M – масса пьезокварца, f_0 – его резонансная частота, ρ – плотность жидкости, α и β – коэффициенты за- тухания. На рис. 1 показаны теоретические зави- симости $\Delta f'$ (а) и $\Delta f''$ (б) от толщины прослойки жидкости при $G' = 10^6$ дин/см² для различных зна- чений $\text{tg}\theta$. Из рисунка можно видеть, что эти зави- симости дают затухающие осцилляции, и при увеличении толщины жидкой прослойки они стремятся при $H \rightarrow \infty$ к предельным значениям $\Delta f'_\infty$ и $\Delta f''_\infty$ соответственно. Таким образом, при

колебаниях пьезокварца вдоль толщины жидкой прослойки распространяется затухающая сдвиго- вая волна. При малых значениях угла механичес- ких потерь максимумы затухания резко выраже- ны и глубина проникновения сдвиговой волны значительна, а при больших значениях $\text{tg}\theta$ глу- бина проникновения волны уменьшается.

Из выражения (2) можно получить положения максимальных значений затухания в виде: $H = \frac{\lambda}{2} n$.

Следовательно, первый максимум затухания дол- жен наблюдаться при толщине прослойки, равной половине длины сдвиговой волны. Измерив длину

Таблица

Жидкости	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\lambda, \text{мкм}$	$G' \times 10^{-6}, \text{дин/см}^2$	$\text{tg}\theta$	при $H \ll \lambda G' \times 10^{-6}, \text{дин/см}^2$
ПМС-25	23	0.95	62	0.2	0.35	0.22
ПМС-100	23	0.97	110	0.58	0.5	0.6
ПМС-200	22	0.97	130	0.80	0.55	0.86
ПМС-400	21	0.97	160	1.0	0.75	1.24
ПМС-900	22	0.98	170	1.08	0.8	1.35

сдвиговой волны, можно определить модуль сдвига жидкости. Учитывая, что комплексное волновое число $\kappa^* = \beta - i\alpha$ имеет вид $(\kappa^*)^2 = \omega^2\rho/G^*$, где G^* – комплексный модуль упругости, то для действительного модуля сдвига получается следующее выражение:

$$G' = \lambda^2 f_0^2 \rho \cos\theta \cos^2(\theta/2). \quad (3)$$

Тангенс угла механических потерь определяется отношением расстояния между положениями первого минимума действительного сдвига частоты и первым максимумом затухания ΔH к длине волны λ , которая подробно описана в работе [5]. На рис. 2 показаны экспериментальные результаты для полимерной жидкости ПМС-25. Кривая 1 (точками) относится к действительному сдвигу резонансной частоты, а кривая 2 – к мнимому. По максимумам затухания можно определить длину сдвиговой волны. Для данной жидкости длина сдвиговой волны равна $\lambda = 62 \text{ мкм}$.

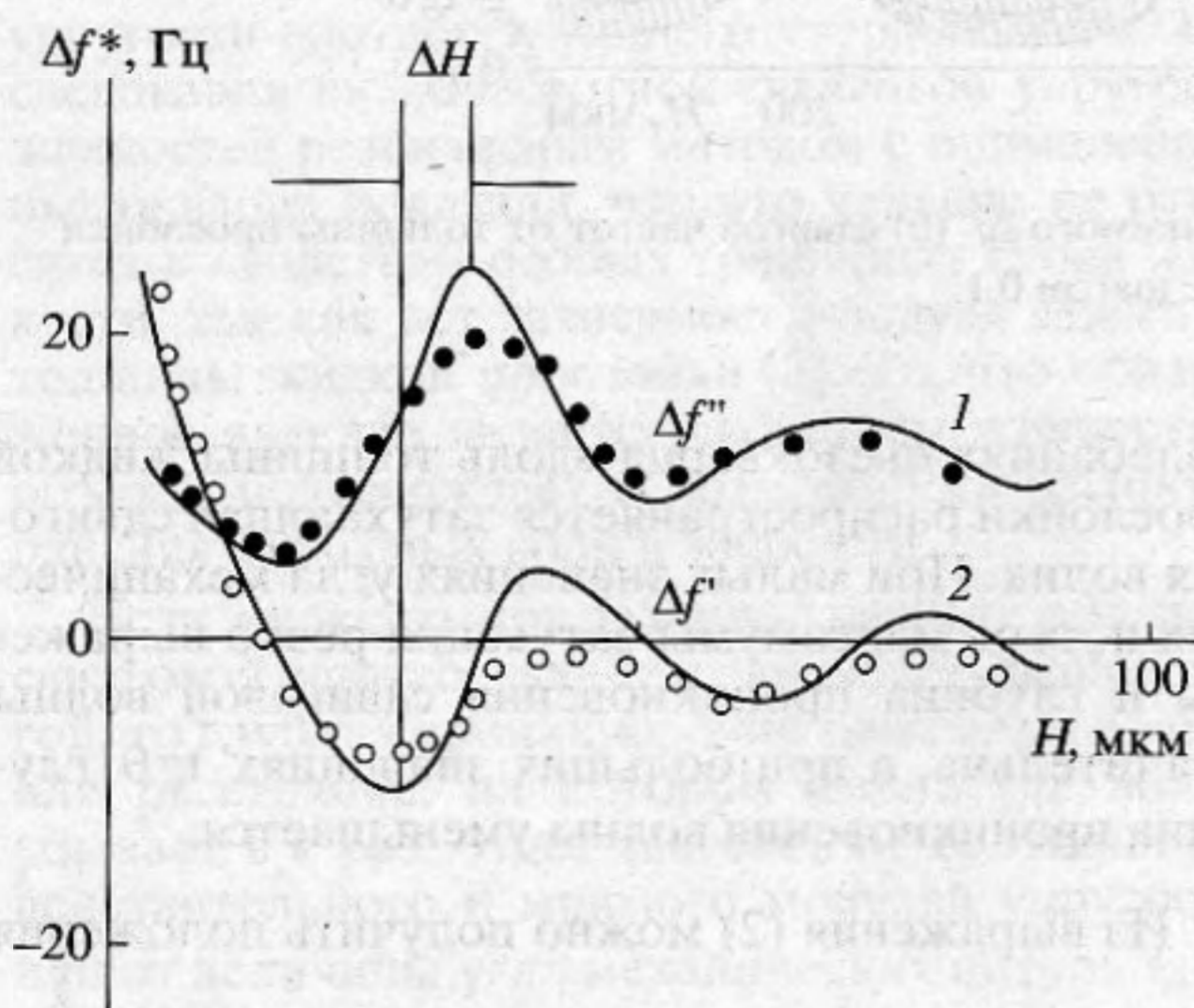


Рис. 2. Зависимости действительного (1) и мнимого (2) сдвигов частот от толщины прослойки для ПМС-25. (Теоретические — сплошные, экспериментальные — точки.)

Расчет по формуле (3) дает для действительного модуля сдвига значение $G' = 0.2 \times 10^6 \text{ дин/см}^2$, а $\text{tg}\theta = 0.33$.

На этом же рисунке сплошными линиями показаны теоретические зависимости сдвигов частот от толщины жидкой прослойки. Видно хорошее согласие экспериментальных и теоретических зависимостей. Эксперименты показали, что для получения лучшей осцилляции сдвигов частот необходимо добиться хорошего сцепления частиц жидкости с рабочими поверхностями пьезокварца и наклейки. В этом случае отсутствует проскальзывание жидкости по контактирующим поверхностям, и энергия колебания пьезокварца максимально переходит в жидкость. Кроме того, наличие на рабочей поверхности у реальных кристаллов нормальной компоненты, несмотря на использование пьезокварца с нулевым коэффициентом Пуассона, вызывает в прослойке жидкости дополнительные деформации сжатия и растяжения, и максимумы затухания сглаживаются. По этим причинам наблюдение осцилляции сдвигов частот для обычных маловязких жидкостей данным методом оказалось затруднительным. Удовлетворительные результаты были получены только лишь для полиметилсилоксановых жидкостей (ПМС), которые являются поверхностно активными и поэтому молекулы жидкости, контактирующие с поверхностями, хорошо сцепляются с ними. Кроме того, вязкие жидкости менее подвержены влиянию нормальной компоненты колебания пьезокварца, поскольку модуль всестороннего сжатия K намного больше G' , что сводит практически к нулю разность фаз колебания наклейки и нормальной составляющей колебания пьезокварца, и толщина жидкой прослойки при колебаниях не меняется. Измеренные значения λ и G' для других ПМС-жидкостей показаны в таблице.

Для этих же жидкостей проведены измерения модуля сдвиговой упругости и тангенса угла механических потерь при толщинах жидкой прослойки, много меньших длины сдвиговых волн, когда $H \ll \lambda$. В этом случае выражения (2) и (3) предельно упрощаются, и для действительной и мнимой

частей комплексного модуля сдвига получают следующие расчетные формулы:

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

$$G'' = \frac{4\pi^2 M f_0 \Delta f'' H}{S}, \quad (5)$$

где $\Delta f'$ и $\Delta f''$ – действительный и мнимый сдвиги резонансной частоты. Для тангенса угла механических потерь будем иметь:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{G''}{G'} = \frac{\Delta f''}{\Delta f'}. \quad (6)$$

Мнимый сдвиг резонансной частоты $\Delta f''$ определяется изменением затухания колебательной системы, т.е. он равен половине изменения ширины резонансной кривой. Из формул (4), (5) видно, что при наличии у исследуемой жидкости комплексного модуля сдвига, зависимости действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины прослойки должны быть линейными.

На рис. 3 показаны экспериментальные зависимости сдвигов частот от обратной толщины для той же жидкости ПМС-25.

Линейность этих зависимостей доказывает, что исследованная жидкость действительно обладает объемным модулем сдвига. В экспериментах применялся пьезокварц X-среза, массой $M = 6.28$ г, у которого на рабочей поверхности коэффициент Пуассона равен нулю. Резонансная частота пьезокварца была равна 74 кГц, размеры $34.7 \times 12 \times 5.5$ мм³, а площадь основания накладки $S = 0.2$ см². По формулам (5) и (6) рассчитаны модули сдвига и тангенсы угла механических потерь. Результаты расчетов для других жидкостей приведены также в таблице.

Сравнивая значения модулей сдвига, полученных двумя методами, можно видеть, что значения G' , полученные при $H \ll \lambda$, несколько выше, чем эти же значения, полученные по длине сдвиговых волн. Это объясняется тем, что при $H \ll \lambda$ в процессе эксперимента не происходит загрязнения контактирующих поверхностей и самой исследуемой жидкости, а также нормальная компонента пьезокварца не оказывает влияния, так как накладка подбиралась достаточно малой по массе. Но, тем не менее, видно удовлетворительное согласие результатов, полученных двумя методами, и они доказывают, что в эксперименте нами измеряются объемные значения сдвиговой упругости исследованных жидкостей.

Анализ результатов работ по исследованию вязкоупругих свойств жидкостей [6] с применением метода отражения сдвиговых волн Мэсона,

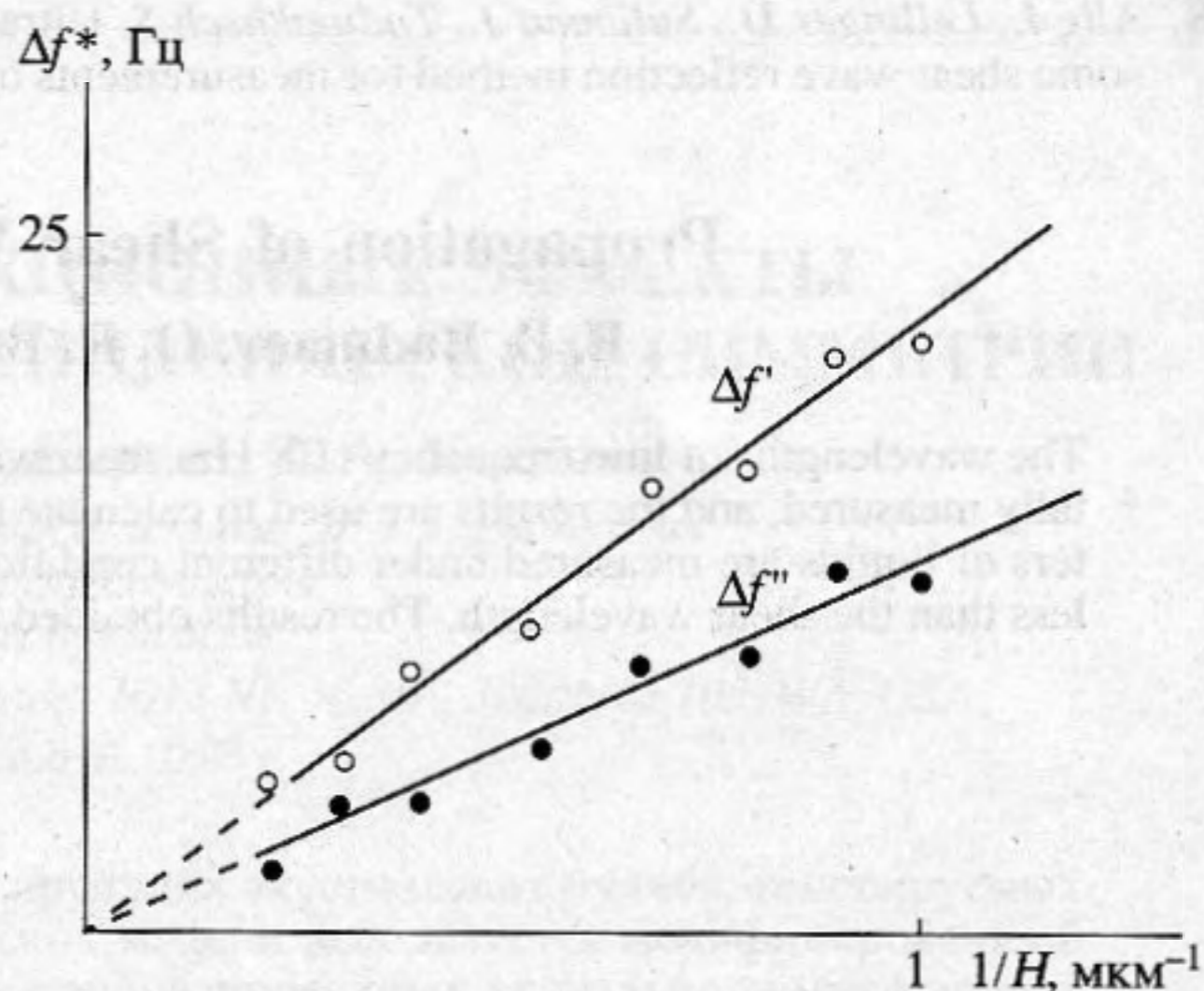


Рис. 3. Зависимости действительного $\Delta f'$ и $\Delta f''$ сдвигов частот от обратной толщины прослойки для ПМС-25.

проведенный в работе [7], показал, что при учете ошибок измерения значения комплексного модуля упругости сравнимы с данными, полученными по представленной методике. Следует ожидать, что усовершенствованный метод Мэсона [8], позволяющий использовать высокочастотную цифровую методику, даст более согласующиеся результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-01-00503).

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. 799–802.
2. Базарон У.Б., Дерягин Б.Д., Булгадаев А.В. Исследование сдвиговой упругости жидкостей и граничных слоев резонансным методом // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 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. 1326–1327.
4. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
5. Дембелова Т.С., Дамдинов Б.Б., Бадмаев Б.Б. и др. Сдвиговые волны в жидкостях // Сб. трудов VI сессии РАО. Москва, 1997. С. 31–34.
6. McSkimin H.J., Andreatch P. Measurement of dynamic shear impedance of low viscosity liquids at ultrasonic frequencies // J. Acoust. Soc. Amer. 1967. V. 42. P. 248–252.
7. Derjaguin B.V., Bazaron U.B., Lamazhapova Kh.D., Tsidypov B.D. Shear elasticity of low-viscosity liquids at low frequencies // Physical Review A. 1990. V. 42. № 4. P. 2255–2258.

8. *Alig I., Lellinger D., Sulimma J., Tadjbakhsh S.* Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of

the viscoelastic properties of polymer films // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68. № 3. P. 1536-1542.

Propagation of Shear Waves in Polymer Liquids

B. B. Badmaev, O. R. Budaev, and T. S. Dembelova

The wavelengths of low-frequency (10^5 Hz) shear waves excited in polymethylsiloxane liquids are experimentally measured, and the results are used to calculate the complex shear moduli. The same viscoelastic parameters of liquids are measured under different conditions with the thickness of the liquid interlayer being much less than the shear wavelength. The results obtained by two methods are found to be in satisfactory agreement.

(Mirrored bleed-through text from the reverse side of the page, appearing as faint, illegible characters.)

(Mirrored bleed-through text from the reverse side of the page, appearing as faint, illegible characters.)