

У. Б. БАЗАРОН, член-корреспондент АН СССР Б. В. ДЕРЯГИН,
К. Т. ЗАНДАНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГОВОЙ УПРУГОСТИ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ СДВИГА

Период релаксации жидкостей τ обычно ⁽¹⁾ оценивают на основании скорости самодиффузии, приравнивая τ к времени оседлого существования отдельных молекул, что для маловязких жидкостей дает значения порядка 10^{-11} — 10^{-10} сек. Однако наличие измеримого модуля сдвига у жидкостей при низких частотах (10^5 гц) ^(2, 3) позволяет предположить, что в жидкостях в ряде случаев могут иметь решающее значение коллективные эффекты, зависящие от взаимного расположения и взаимодействия групп молекул. Релаксация неравновесного состояния конфигурации большого коллектива частиц требует согласованного перемещения многих молекул, примерно одного порядка с числом молекул, участвующих в коллективном эффекте. Время релаксации таких состояний может на много порядков превышать время оседлого существования одной молекулы. Поэтому, повидимому, оказалось возможным обнаружение объемного модуля сдвига жидкостей динамическим методом при сравнительно низких частотах.

Сущность динамического метода измерения сдвиговой упругости заключается в следующем. Пьезокварцевый кристалл, закрепленный между двумя стальными иглами в точках на узловой линии, возбуждается на основной резонансной частоте. Боковая горизонтальная грань пьезокварца, совершающая тангенциальные смещения, контактирует с пленкой жидкости, накрытой кварцевой накладкой. При колебаниях пьезокварца пленка жидкости испытывает деформации сдвига, так как накладка практически покоится ввиду слабой связи, осуществляемой пленкой. При наличии у жидкости сдвиговой упругости резонансная частота пьезокварца должна возрасти обратно пропорционально толщине пленки жидкости. Таким образом, динамический метод основан на изучении влияния, которое оказывает сила добавочной связи (через пленку жидкости) на резонансные свойства пьезокварца.

Эффективный модуль сдвига жидкости определяется формулой

$$G = 4\pi^2 M f_0 \Delta f H / S, \quad (1)$$

где M — масса пьезокварца, f_0 — его резонансная частота, Δf — положительный сдвиг резонансной частоты, H — толщина жидкой пленки, S — площадь основания накладки.

Формула (1) справедлива при условии, что толщина пленки H намного меньше длины сдвиговой волны в жидкостях. Из формулы также можно видеть, что при наличии у жидкости объемного модуля сдвига произведение сдвига частоты Δf на толщину пленки H должно быть постоянной величиной.

В работе ⁽³⁾ было показано, что эффективный модуль сдвига зависит от амплитуды колебания пьезокварца, и поэтому для получения наиболее «чистых» значений сдвиговой упругости жидкостей, наименее искаженных влиянием затухания, строились зависимости сдвига частоты пьезокварца от амплитуды снимаемых с него напряжений при постоянной толщине пленки жидкости и кривые экстраполировались к нулевой амплитуде. Дан-

ная работа посвящена более детальному исследованию этого явления при малых углах сдвиговой деформации.

Для определения углов сдвига необходимо знать амплитуду колебания кварца в зависимости от снимаемого с него напряжения. Характер зависимости определяется размером электродов, величиной воздушного зазора между электродом и пьезокварцем и т. п. Мы воспользовались для определения этой зависимости методом интерферометра Фабри — Перо. Одна из торцевых сторон пьезокварца с оптической полировкой покрывалась

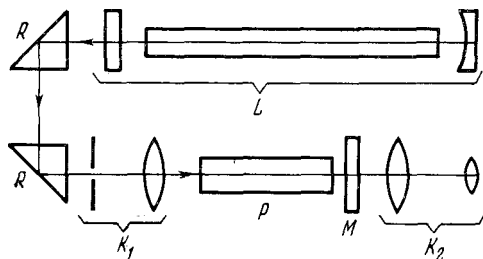


Рис. 1. Принципиальная схема установки для определения амплитуды пьезокварца; R — поворотные призмы

Плоская пленка серебра с высоким коэффициентом отражения и служила зеркалом интерферометра Фабри — Перо. Пленки серебра на торце пьезокварца и на второе зеркало интерферометра (плоская стеклянная пластинка) наносились термическим испарением в вакууме по методике получения пленок для многолучевой интерферометрии (4). В качестве источника монохроматического света был использован He — Ne газовый лазер с длиной волны $\lambda = 6328 \text{ \AA}$.

Принципиальная схема установки для определения амплитуды пьезокварца показана на рис. 1. Свет газового лазера L, пройдя через коллиматор K_1 , падает на интерферометр Фабри — Перо, состоящий из пьезокварца P и плоского зеркала M. После интерферометра лучи попадают в автоколлиматор K_2 , при помощи которого можно визуально наблюдать интерференционную картину и непосредственно измерять углы φ между нормалью к зеркалам интерферометра и лучами, образующими светлые кольца, которые удовлетворяют условию

$$2h \cos \varphi = m\lambda. \quad (2)$$

Здесь h — расстояние между зеркалами интерферометра, m — порядок интерференции. Второе зеркало интерферометра находится в специальной оправе с микровинтами, которые позволяют устанавливать зеркало плоскопараллельно к торцевой поверхности пьезокварца. Кварцедержатель жестко связан с держателем оправы второго зеркала, чтобы ликвидировать различного рода вибрации.

При колебаниях пьезокварца расстояние h периодически меняется, и интерференционные кольца вследствие этого будут уширяться пропорционально амплитуде пьезокварца. При этом из (2) следует, что амплитуда пьезокварца определяется простой формулой

$$A = \frac{1}{2} h \varphi \Delta \varphi, \quad (3)$$

где $\Delta \varphi$ — уширение интерференционного кольца, выраженное в радианах. Формула (3) выведена при условии, что угол φ достаточно мал.

Расстояние h можно определить по значению углов φ_1 и φ_2 для двух соседних интерференционных колец по формуле

$$h = \lambda / (\varphi_1^2 - \varphi_2^2). \quad (4)$$

На рис. 2 показана полученная описанным методом зависимость амплитуды пьезокварца от снимаемого с него напряжения; зависимость линейная.

Точность измерения амплитуды данным методом довольно высока: например, при малых колебаниях пьезокварца ошибка измерения напряже-

ния, снимаемого с кварца, была не более 0,1 мв, что соответствует изменению амплитуды на $\sim 0,1 \text{ \AA}$.

Экспериментальная установка и методика измерения были такие же, как и в работах (^{2, 3}). Отличие заключалось в том, что был применен пьезокварц с малой нормальной компонентой на рабочей грани. Эксперименты показали, что наличие нормальной компоненты, так же как и большая амплитуда продольных колебаний пьезокварца, может существенно уменьшать измеряемый модуль сдвига за счет частичного разрушения надмоле-

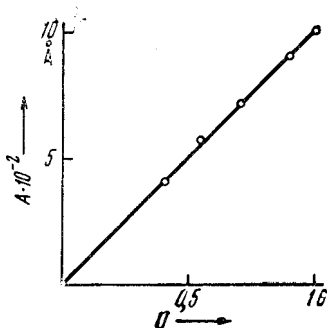


Рис. 2

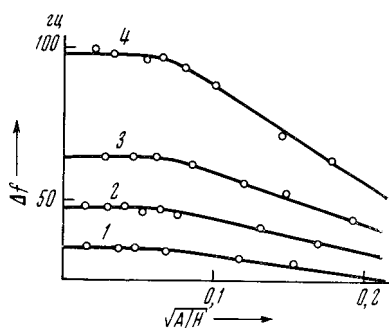


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость амплитуды пьезокварца от снимаемого с него напряжения

Рис. 3. Зависимость Δf от угла сдвига ($\arctg A/H$) для этиленгликоля при разной толщине пленки (μ): 1 — 2,16; 2 — 1,77; 3 — 1,36; 4 — 0,96

Рис. 4. Зависимость G от угла сдвига для диэтиленгликоля (1), циклогексанола (2) и вазелинового масла (3)

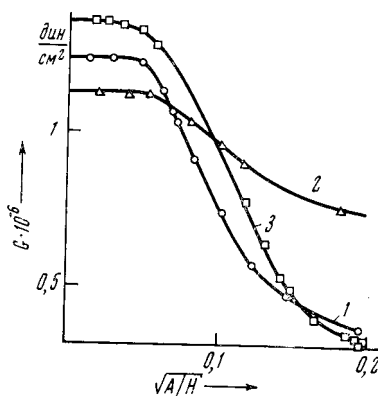


Рис. 4

кулярной структуры жидкости. Исследуемые жидкости очищались известными методами: низкокипящие жидкости перегонялись, высококипящие — фильтровались. Поверхности пьезокварца и накладки обрабатывались в хромовой смеси, затем подвергались выпариванию в течение одного часа.

На рис. 3 показана зависимость положительного сдвига частоты пьезокварца от угла сдвига для этиленгликоля при различной толщине пленки. Можно видеть, что для всех пленок сдвиги частот остаются постоянными при малых углах сдвиговой деформации. Нарушение этой зависимости наступает при одном и том же угле сдвига для любой толщины. Наличие горизонтального плато говорит о пропорциональности в этой области упругого напряжения сдвига величине деформации сдвига.

На рис. 4 показаны зависимости модуля сдвига от угла деформации для трех жидкостей. Модуль сдвига, начиная с определенного угла деформации сдвига, характерного для каждой жидкости, начинает довольно резко уменьшаться, стремясь с увеличением угла сдвига к определенному предельному значению. Аналогичные результаты получаются со всеми исследованными жидкостями, кроме неполярного вазелинового масла: переход к плато с уменьшением угла сдвига происходит не столь резко, как для полярных жидкостей, т. е. граница линейной упругости для него более раз-

мыта (рис. 4, 3). Наличие горизонтального плато доказывает, что при малых углах сдвиговой деформации жидкости ведут себя как упругие тела, подчиняющиеся закону Гука.

По данным рис. 4, можно определить критический угол сдвига φ_k и напряжение сдвига P_k , при которых нарушается линейная зависимость между упругой силой и деформацией. В табл. 1 приведены соответствующие значения для исследованных жидкостей.

Полученные в данной работе результаты говорят о том, что у жидкостей существует развитая надмолекулярная структура со сравнительно большим периодом релаксации. При напряжениях сдвига, больших предельного, равновесная надмолекулярная структура начинает разрушаться,

Таблица 1

Жидкости	$t, ^\circ\text{C}$	$G \cdot 10^{-6}, \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	$P_k \cdot 10^{-3}, \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	$\varphi_k, ^\circ$
Этиленгликоль	24	0,91	3,27	12
Диэтиленгликоль	23	1,22	3,65	10
Октиловый спирт	23	1,34	2,54	7
Циклогексанол	24	1,12	2,80	9
Олеиновая кислота	24	1,60	4,00	10
Вазелиновое масло	24	1,36	2,20	~6

вследствие чего измеряемый модуль сдвига уменьшается. Таким образом, сдвиговая упругость является весьма структурочувствительным свойством жидкостей.

Выше было упомянуто, что наличие нормальной компоненты на рабочей грани пьезокварца также влияет на измеряемый модуль сдвига. Именно поэтому в ранних экспериментах, описанных в работе (³), наличие горизонтального плато при малых углах сдвиговой деформации не было обнаружено, так как из-за частичного разрушения структуры жидкостей нормальной компонентой колебаний пьезокварца измерения были проведены в сущности при неравновесной нарушенной надмолекулярной структуре. Этим же объясняется и разница между измеренными значениями модулей сдвиговой упругости в данной работе и в работах (^{2, 3}).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность О. Р. Будаеву за оказанную помощь в работе.

Бурятский государственный педагогический
институт им. Доржи Банзарова
Улан-Удэ

Поступило
10 VII 1972

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. И. Френкель, Кинетическая теория жидкостей, Изд. АН СССР, 1949.
² У. Б. Базарон, Б. В. Дерягин, А. В. Булгадаев, ДАН, 160, № 4 (1965); 166, № 3 (1966). ³ У. Б. Базарон, Б. В. Дерягин, А. В. Булгадаев, ЖЭТФ, 51, 10 (1966). ⁴ Л. Холлэнд, Нанесение тонких пленок в вакууме, 1963.