

## Модуль сдвига и динамическая вязкость воды при малых градиентах скорости течения

Т.С. Дембелова,\* Д.Н. Макарова,† Б.Б. Бадмаев, Б.В. Бадархаев

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения СО РАН,

лаборатория физики молекулярных структур,

Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать)

Экспериментально установлено, что с увеличением амплитуды сдвиговой деформации действительный модуль сдвига и эффективная вязкость уменьшаются. Измерения, проведенные при малых градиентах скорости течения жидкости, показали, что по мере уменьшения скорости течения вязкость жидкости растет, что, вероятно, связано со структурированием жидкости.

PACS: 66.20.-d; 83.60.Df

УДК: 532.135

Ключевые слова: модуль сдвига, акустический резонансный метод, эффективная вязкость, динамическая вязкость.

В работах [1–3] впервые было показано, что жидкости независимо от полярности и вязкости обладают комплексной сдвиговой упругостью при частоте сдвиговых колебаний порядка  $10^5$  Гц. Дальнейшее всестороннее исследование [4–8] показало, что низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей является их объемным свойством. Наличие низкочастотной сдвиговой упругости жидкостей было обнаружено акустическим резонансным методом с применением пьезокварцевого кристалла X — 18,5° среза в виде прямоугольного бруска, с резонансной частотой 74 кГц. Грань, колеблющаяся на основной резонансной частоте в собственной плоскости, соприкасается на одном конце с прослойкой жидкости, накрытой кварцевой накладкой. При тангенциальных смещениях пьезокварца прослойка жидкости будет испытывать деформации сдвига, а накладка при этом покоится. Выбор среза X–18,5° обусловлен тем, что у него коэффициент Пуассона равен нулю. Поэтому при сдвиговых деформациях данного пьезокварца прослойка жидкости испытывает чисто сдвиговые деформации. В зависимости от толщины прослойки жидкости изменяются параметры резонансной кривой пьезокварца. Если прослойка жидкости обладает сдвиговой упругостью, то резонансная частота будет возрастать. В случае, если бы в прослойке действовали только диссипативные вязкие силы, то резонансная частота должна уменьшаться. Из теории метода [9] для действительной и мнимой частей комплексного модуля сдвига жидкости получаются следующие расчетные формулы:

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

где  $M$  — масса пьезокварца, равная 6,24 г.,  $\Delta f'$  — сдвиг резонансной частоты пьезокварца,  $\Delta f''$  — изменение полуширины резонансной кривой пьезокварца (мнимый сдвиг частоты),  $f_0$  — его собственная резо-

нансная частота,  $H$  — толщина прослойки жидкости  $S = 0,2 \text{ см}^2$  — площадь основания накладки.

Тангенс угла механических потерь рассчитывается по следующей формуле:

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

В работе [10] получены экспериментальные зависимости действительного и мнимого сдвигов частот от обратной величины толщины жидкой прослойки для воды и гликолей. Эти зависимости оказались линейными, что согласно выражению (1) означает наличие у исследованных жидкостей комплексной сдвиговой упругости при частоте колебания 74 кГц. Расчет по формулам (1) и (2) для модуля сдвига и тангенса угла механических потерь дают значения  $G' = 0,31 \times 10^6 \text{ дин/см}^2$ ,  $\text{tg } \theta = 0,24$  для воды и  $G' = 1,46 \times 10^6 \text{ дин/см}^2$ ,  $\text{tg } \theta = 0,31$  для диэтиленгликоля.

Интересные результаты получены при исследовании сдвиговой упругости жидкостей в зависимости от амплитуды колебания пьезокварца [11, 12]. Исследования показали, что при малых углах сдвига наблюдается область линейной упругости (гуковская область), когда напряжение в прослойке жидкости оказывается пропорциональным величине деформации. При дальнейшем увеличении угла сдвига модуль упругости начинает уменьшаться, а мнимый модуль, оставаясь постоянным при малых углах, проходит через максимум. При этом максимум мнимого модуля соответствует точке перегиба на кривой зависимости действительного модуля сдвига. Эти результаты можно объяснить следующим образом. Предполагается, что жидкость обладает развитой кластерной структурой, и она при малых углах сдвига остается неизменной, т. е. наблюдается гуковская область. Однако при некотором критическом напряжении сдвига равновесная структура (кластер) начинает разрушаться, что ведет к уменьшению действительного модуля сдвига. Если по реологической модели Максвелла рассчитать эффективную вязкость  $\eta_{\text{эф}} = \frac{G'(1 + \text{tg}^2 \theta)}{\omega \text{tg } \theta}$ , то оказывается, что

\*E-mail: lmf@ipms.bsnet.ru

†E-mail: dagzama@mail.ru

при малых углах деформации вязкость намного больше табличной вязкости. Так для диэтиленгликоля и воды эффективная вязкость оказалась равным соответственно 10,7 П и 2,42 П. При дальнейшем увеличении угла сдвига эффективная вязкость уменьшается, асимптотически приближаясь к значениям табличной вязкости. Из этого предположено, что табличная вязкость характеризует вязкость жидкости с разрушенной пространственной структурой, соответствующей ламинарному течению в обычных вискозиметрах. Поэтому возможность прямого измерения вязкости жидкости с неразрушенной равновесной структурой представляет большой интерес. С этой целью была сконструирована установка (рис. 1) по измерению вязкости жидкостей при предельно малых градиентах скорости течения, когда можно было ожидать, что при элементарных актах вязкого течения структура жидкости мало изменяется.

Исследуемая жидкость перетекает из сосуда 2 в сосуд 3 по длинному капилляру 1 под действием создаваемой в них разности уровней, причем сечение первого сосуда примерно в 100 раз меньше второго, что позволяет пренебречь изменением уровня во втором сосуде. Кроме того, оба сосуда сообщаются широкой стеклянной трубкой с краном 4, при помощи которого уровни жидкостей в сосудах можно выравнивать. Сосуды герметично закрываются и между собой имеют воздушное сообщение.

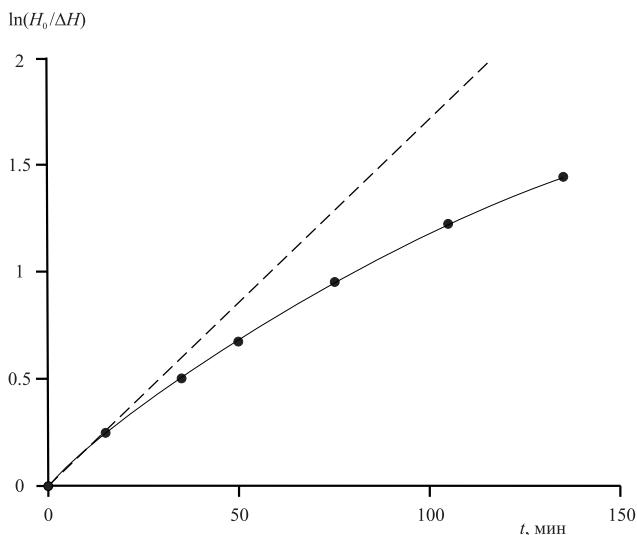


Рис. 1: Принципиальная схема установки для измерения вязкости: 1 — капилляр, 2 и 3 — сосуды с жидкостью, 4 — кран для выравнивания уровней, 5 — катетометр

Изменение уровня жидкости в малом сосуде измерялось вертикальным катетометром с точностью до 0,1 мкм. Такая точность достигалась увеличением дифракционной картины от границы мениск жидкости–воздух. Установка располагается на специальном фундаменте, изолированном от пола здания, чтобы исключить возможные вибрации установки.

Зависимость между разностью уровней в сосудах и временем, когда исследуемая жидкость перетекает по капилляру из одного сосуда в другой можно получить, воспользовавшись законом Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8l\eta} t, \quad (3)$$

где  $V$  — объем жидкости, вытекающей из капилляра за время  $t$ ,  $r$  — радиус капилляра,  $l$  — его длина,  $\Delta p$  — движущая разность давлений,  $\eta$  — вязкость жидкости.

Можно показать, что между разностью уровней  $\Delta H$  в сосудах и временем  $t$  существует следующая зависимость:

$$\ln \frac{\Delta H_0}{\Delta H} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8l\eta} t \quad (4)$$

где  $\Delta H_0$  — начальная разность уровней,  $\rho$  — плотность жидкости,  $S$  — площадь сечения малого сосуда, из которого вытекает жидкость.

Из выражения (4) следует, что если вязкость жидкости при любой разности давлений, или при всех градиентах скорости течения остается постоянной, то зависимость  $\ln(\Delta H_0/\Delta H)$  от времени должна быть линейной. Если же при малых градиентах скорости течения вязкость будет повышаться, то соответственно будет наблюдаться отклонение от этой зависимости. Для измерения повышенной вязкости использовался капилляр с внутренним диаметром 0,1 см и длиной 90 см. Площадь сечения малого сосуда составляла 2,5 см<sup>2</sup>.

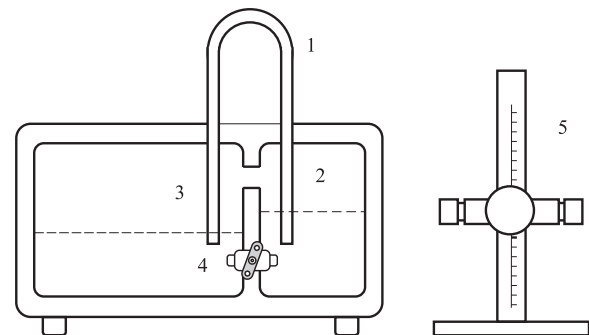


Рис. 2: Зависимость  $\ln(\Delta H_0/\Delta H)$  от времени  $t$  для воды

На рис. 2 представлена зависимость  $\ln(\Delta H_0/\Delta H)$  от времени для воды. Можно видеть, что при больших градиентах скорости течения зависимость линейная. Однако, начиная с определенного значения разности уровней, наблюдается все большее отклонение от линейной зависимости, что свидетельствует о повышении наблюдаемой вязкости, причем при меньших значениях  $\Delta H_0$  отклонение начинается раньше.

Из формулы (4) видно, что вязкость обратно пропорциональна тангенсу угла наклона кривой зависимости  $\ln(\Delta H_0/\Delta H)$  от  $t$  и для расчета вязкости можно получить выражение:

$$\eta = \frac{\eta_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (5)$$

Соответствующий расчет вязкости по тангенсу угла наклона кривой дает для воды значение 0,022 П, тогда как табличная вязкость равна 0,01 П. Вязкость по мере уменьшения градиента скорости течения увеличивается в 2,2 раза. Аналогичные результаты получены и для других исследованных жидкостей.

Таким образом, исследование показало наличие особой структуры жидкости, подобной тиксотропной структуре коллоидных растворов, в условиях, близких к покою. В покое устанавливаются временные связи между молекулами или кластерами, приводящие к более упорядоченной структуре с повышенной вязкостью. При механическом воздействии временные зацепления нарушаются, приводя к значениям табличной вязко-

сти, которая относится к жидкости с разрушенной пространственной структурой, соответствующей ламинарному течению жидкостей.

Рассмотренное явление может иметь важное практическое приложение во всех процессах, где преобладают медленные течения, например в грунтоведении и почвоведении, в частности, для объяснения явления морозного пучения грунтов, при процессах фильтрации жидкостей и растворов через искусственные и естественные мембраны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-98012-р\_сибирь\_а, 12-02-98003-р\_сибирь\_а).

- 
- [1] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ЖЭТФ. **51**, Вып. 4(10). С. 969. (1966).
- [2] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ДАН СССР. **160**, № 4. С. 799. (1965).
- [3] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Булгадаев А.В. ДАН СССР. **166**, № 3. С. 639. (1966).
- [4] Бадмаев Б.Б., Будаев О.Р., Дембелова Т.С. Акустический журнал. **45**, № 5. С. 610. (1999).
- [5] Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов С.А., Дембелова Т.С. Акустический журнал. **56**, № 5. С. 602. (2010).
- [6] Макарова Д.Н., Бадмаев Б.Б., Дембелова Т.С., Будаев О.Р., Дамдинов Б.Б. Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества. **1**. С. 134. (М.: ГЕОС, 2010).
- [7] Badmaev B., Dembelova T., Budaev O., Damdinov B. Ultrasonics. **44**. P. e1491. (2006).
- [8] Badmaev B., Dembelova T., Damdinov B., Makarova D., Budaev O. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. **383**. P. 90. (2011).
- [9] Базарон У.Б., Дерягин Б.В., Будаев О.Р. ДАН. **205**, № 6. С. 1326. (1972).
- [10] Бадмаев Б.Б., Занданова К.Т., Будаев О.Р., Дерягин Б.В., Базарон У.Б. ДАН СССР. **254**, № 2. С. 381. (1980).
- [11] Занданова К.Т., Дерягин Б.В., Будаев О.Р., Базарон У.Б. ДАН. **215**, № 2. С. 309. (1974).
- [12] Бадмаев Б.Б., Базарон У.Б., Будаев О.Р., Дандарон Л.Б., Дерягин Б.В., Занданова К.Т., Ламажапова Х.Д. Коллоидный журнал. **44**, № 5. С. 841. (1982).

## Shear modulus and the dynamic viscosity of water at small gradients of flow velocity

T.S. Dembelova<sup>a</sup>, D.N. Makarova<sup>b</sup>, B.B. Badmaev, B.V. Badarkhaev

*Institute of Physical Materials Science of RAS (Siberian Branch). Ulan-Ude 670047, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>lmf@ipms.bscnet.ru, <sup>b</sup>dagzama@mail.ru*

Experimentally established, that the real shear modulus and the effective viscosity of liquid decrease with the increasing of the amplitude of shear deformation. Measurements carried out at small gradients of flow velocity showed that the viscosity of liquid increases with flow velocity decreasing. It is probably due to the structuring of the liquid.

PACS: 66.20.-d; 83.60.Df

Keywords: Shear modulus, the acoustical resonance method, the effective viscosity, the dynamic viscosity.

Received

### 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. Макарова Дагзана Николаевна — научный сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: dagzama@mail.ru.
3. Бадмаев Бадма Банзаракцаевич — докт. техн. наук, заведующий лабораторией, доцент; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.
4. Бадархаев Баир Васильевич — инженер; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: lmf@ipms.bscnet.ru.