

03

## Объемная вязкость суспензии наночастиц оксида кремния

© М.И. Пряжников<sup>1,2</sup>, А.В. Минаков<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: MPryazhnikov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 25 марта 2020 г.

Принято к публикации 26 марта 2020 г.

При помощи акустического спектрометра впервые получены данные об объемной вязкости водной суспензии наночастиц SiO<sub>2</sub> (Ludox TM-50). Рассмотрен широкий диапазон массовых концентраций наночастиц (от 1 до 50 wt.%). Измерены спектры коэффициента затухания ультразвука, а также коэффициенты продольной и динамической вязкости. Получены зависимости коэффициентов динамической и объемной вязкости суспензий от концентрации наночастиц.

**Ключевые слова:** объемная вязкость, суспензия наночастиц, оксид кремния, динамическая вязкость, наножидкость, акустическая спектроскопия, затухание ультразвука, скорость звука.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49526.18237

Объемная вязкость (иногда называемая второй вязкостью) является характеристикой процесса диссипации энергии при объемных деформациях среды. Упоминание об объемной вязкости можно найти, например, в книге по гидродинамике Ландау [1]. Как отмечают в Хаппель и Бреннер, „объемная вязкость важна в случаях, в которых жидкость подвержена действию быстропеременных сил, как, например, при ультразвуковых колебаниях“ [2]. Примерами таких случаев являются задачи сверхзвукового обтекания тел [3], течения с ударной волной [4]. Уравнения движения сжимаемой жидкости имеют следующий вид:

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \right] = -\text{grad } P + \eta \Delta \mathbf{v} + \left( \frac{4}{3} \eta + \eta_{vol} \right) \text{grad div } \mathbf{v}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность,  $\mathbf{v}$  — скорость,  $t$  — время,  $P$  — давление,  $\eta$  и  $\eta_{vol}$  — коэффициенты динамической и объемной вязкости соответственно.

Около 175 лет назад Стокс впервые высказал предположение [5], что поглощение звука связано с силами внутреннего трения (или вязкости), которые возникают при распространении звуковой волны. В 1845 г. он получил выражение [5], из которого следует, что коэффициент поглощения  $\alpha$  пропорционален квадрату угловой частоты  $\omega$  и коэффициенту вязкости  $\eta$ :

$$\alpha = \frac{2\omega^2 \eta}{3\rho V^3}, \quad (2)$$

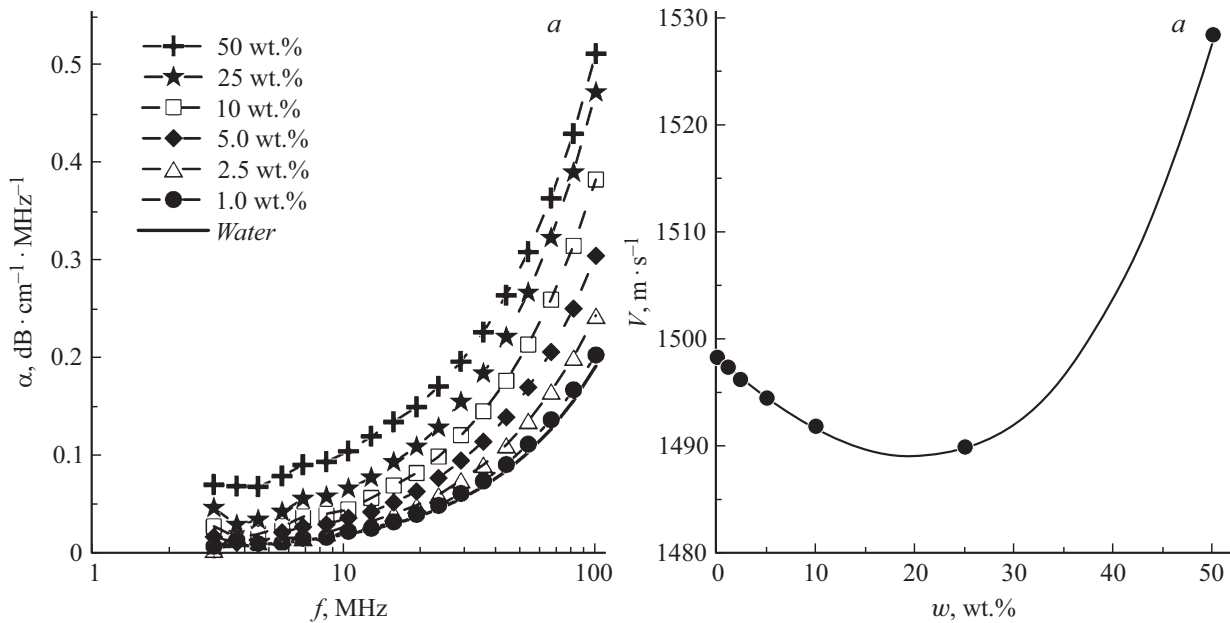
где  $V$  — скорость звука.

В выражении (2) предполагается, что жидкость является несжимаемой ньютоновской, и понятие объемной вязкости отсутствует. Помимо этого Стокс в [5] упоминает о возможном существовании объемной вязкости в жидкостях. Но так как на тот момент не существовало методов ее измерения, она игнорировалась и

принималась равной нулю. С развитием ультразвуковых методов изучения механических свойств жидкостей на высоких частотах стало очевидно, что выражение Стокса (2) неполное [6]. Для ньютоновских жидкостей коэффициент поглощения пропорционален так называемой продольной вязкости  $\eta_{long}$ , которая складывается из динамической вязкости и объемной вязкости при условии отсутствия у них частотной зависимости:

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho V^3} \eta_{long} = \frac{\omega^2}{2\rho V^3} \left[ \frac{4}{3} \eta + \eta_{vol} \right]. \quad (3)$$

Исследованию динамической вязкости сред в свое время было уделено очень много внимания, в то время как данных по объемной вязкости практически нет. В известных экспериментальных работах имеется лишь информация об объемной вязкости всего для пары десятков чистых жидкостей [7], жидкого аргона, ксенона и криптона [8], жидких металлов [9], жидких кристаллов [10]. Экспериментальных данных по объемной вязкости суспензий практически нет. В настоящей работе проведено исследование спектра коэффициента затухания ультразвука и объемной вязкости суспензий наночастиц оксида кремния (Ludox TM-50) при помощи акустического и электроакустического спектрометра. Суспензия наночастиц оксида кремния сферической формы Ludox TM-50 была приобретена в Sigma-Aldrich. Массовая концентрация наночастиц SiO<sub>2</sub> в исходной суспензии 50 wt.%. Ludox TM-50 имеет высокую стабильность. Размер первичных частиц 22 nm. Средний гидродинамический размер частиц, измеренный акустическим спектрометром DT1202, равен 30 nm (в 10 wt.% суспензии). Диапазон рассмотренных массовых концентраций наночастиц от 1 до 50 wt.%. Исходно бралась готовая суспензия Ludox TM-50 (50 wt.%), остальные концентрации были получены разбавлением (раствором 0.01 M KCl).

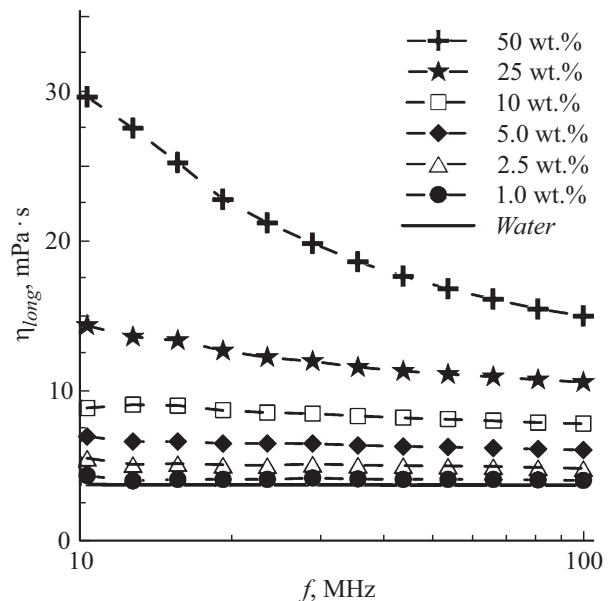


**Рис. 1.** Спектр коэффициента затухания ультразвука в суспензиях с различной концентрацией наночастиц (а) и зависимость скорости звука в суспензиях от концентрации наночастиц (b).

Измерение коэффициента динамической вязкости проводилось с помощью вискозиметра Brookfield DV2T с использованием шпинделей ULA и LV-61. Предел повторяемости результата измерений вязкости не более 0.5%, предел допускаемой приведенной погрешности для шпинделя ULA составляет  $\pm 1\%$ , а для LV-61  $\pm 2\%$ . Вискозиметр имеет термостатирующую ячейку, которая соединена с циркуляционным термостатом BT10-1, для поддержания постоянной температуры ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ). Измерение коэффициента вязкости проведено при постоянной температуре жидкости ( $25^\circ\text{C}$ ). Коэффициент динамической вязкости рассчитывался как среднее по пяти измерениям.

Спектр коэффициента ультразвукового затухания измерялся при помощи акустического и электроакустического спектрометра DT1202 (Dispersion Technologies). Данный прибор предназначен для характеристики дисперсий в широком диапазоне концентраций частиц (0.1–60 vol.%). Акустический сенсор прибора измеряет коэффициент затухания ультразвука ( $(0-20) \pm 0.01 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ ) в очень широком динамическом диапазоне частот (от 1 до 100 MHz), а также скорость звука. В спектрометре имеется камера, в которой расположены излучатель ультразвуковых волн и приемник ультразвукового сигнала. Камера заполняется исследуемой жидкостью, в которой происходит распространение ультразвука от излучателя к приемнику. При этом ультразвуковые волны испытывают рассеяние на частицах, что приводит к изменениям в спектре ультразвукового сигнала.

Спектры коэффициента ультразвукового затухания для каждой наносуспензии измерялись 10 раз, а затем усреднялись. Спектры коэффициента затухания для различных концентраций наночастиц показаны на рис. 1, а.



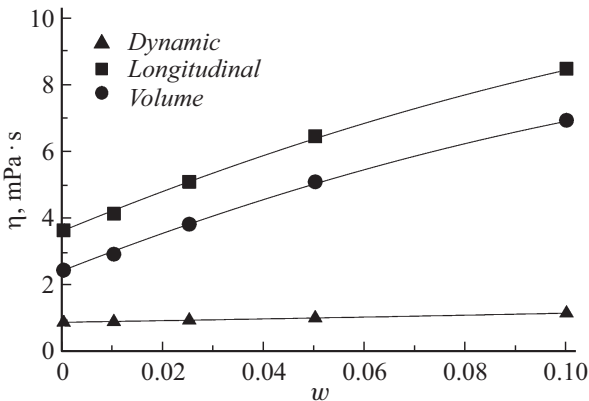
**Рис. 2.** Зависимости коэффициента продольной вязкости суспензии от частоты ультразвука.

Как видно, добавление наночастиц приводит к увеличению коэффициента затухания ультразвука. На низких частотах коэффициент затухания с ростом концентрации наночастиц возрастает сильнее. Зависимость скорости звука в суспензии от концентрации наночастиц приведена на рис. 1, b. Используя измеренные данные о коэффициенте затухания, скорости звука и частоте излучения, с помощью формулы (3) можно определить значения продольной вязкости  $\eta_{long}$ . Зависимость продольной вязкости суспензий от частоты излучения для различных

Коэффициенты продольной ( $\eta_{long}$ ), динамической ( $\eta$ ) и объемной ( $\eta_{vol}$ ) вязкости (в  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ) дистиллированной воды при температуре  $25^\circ\text{C}$

$\eta_{long}$	$\eta$	$\eta_{vol}$	$\eta_{vol}$ [6]*	$\eta_{vol}$ [7]	$\eta_{vol}$ [11]
3.64	0.89	2.45	3.09	2.43	2.47

\* Представлено значение для температуры воды  $15^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента вязкости суспензий от массовой доли наночастиц в суспензии. Символы — эксперимент, линии — корреляции.

концентраций наночастиц приведена на рис. 2. Было установлено, что продольная вязкость дистиллированной воды не зависит от частоты ультразвука. Среднее значение продольной вязкости воды равно  $3.64 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ . Динамическая вязкость воды при  $25^\circ\text{C}$  равна  $0.89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ . Таким образом, коэффициент объемной вязкости воды  $\eta_{vol} = \eta_{long} - \frac{4}{3}\eta$  составляет  $2.45 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ . В таблице приведено сравнение измеренного значения коэффициента объемной вязкости воды с измерениями других авторов. Как видно, наблюдается хорошее согласие с другими работами [6,7,11].

Коэффициент продольной вязкости суспензий растет с увеличением концентрации наночастиц. При низких концентрациях наночастиц коэффициент затухания не зависит от частоты излучения. При увеличении концентрации наночастиц свыше  $10 \text{ wt.}\%$  такая зависимость появляется. С увеличением частоты излучения продольная вязкость суспензий снижается.

С помощью ротационного вискозиметра проведено измерение зависимости коэффициента динамической вязкости от концентрации наночастиц. Анализ сдвиговой реологии показал, что все рассмотренные суспензии ньютоновские. Измеренные значения продольной и сдвиговой вязкости позволили впервые определить значения объемной вязкости наносуспензии (рис. 3). При определении коэффициента объемной вязкости использовались значения коэффициента продольной вязкости, осредненные по диапазону частот  $10\text{--}100 \text{ MHz}$ .

Полученные зависимости коэффициентов вязкости суспензии от концентрации наночастиц хорошо описы-

ваются выражением

$$\eta_{sus p}(w) = \eta_0(1 + aw + bw^2), \quad (4)$$

где  $\eta_0$  — коэффициент соответствующей вязкости воды при  $25^\circ\text{C}$  [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ],  $a$ ,  $b$  — константы. Здесь концентрация выражена в массовых долях. Формула (4) применима для массовой доли  $w < 0.1$ .

Для всех зависимостей (динамической, продольной и объемной) были определены константы  $a$  и  $b$ . Для динамической вязкости  $a = 2.7$  и  $b = 3.6$ , для продольной  $a = 17$  и  $b = -37$ , а для объемной вязкости  $a = 24$  и  $b = -58$ . Сравнивая поведение коэффициентов объемной и динамической вязкости, можно сделать вывод, что наночастицы оказывают более сильное влияние на объемную вязкость, чем на динамическую.

Таким образом, в работе впервые получены экспериментальные данные для коэффициента объемной вязкости суспензий наночастиц оксида кремния.

### Финансирование работы

Реологическое исследование проведено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО „Сибирский федеральный университет“ (номер FSRZ-2020-0012), а акустические измерения выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-79-20218).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. London: Pergamon, 1959. 536 p.
- [2] Ханпель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 632 с.
- [3] Chikitkin A.V., Rogov B.V., Tirsky G.A., Utyuzhnikov S.V. // Appl. Numer. Math. 2015. V. 93. P. 47–60. DOI: 10.1016/j.apnum.2014.01.004
- [4] Boukharfane R., Martínez Ferrer P.J., Mura A., Giovangigli V. // Eur. J. Mech. B. 2019. V. 77. P. 32–47. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2019.02.005
- [5] Stokes G.G. // Trans. Cambridge Phil. Soc. 1845. V. 8. N 22. P. 287–342.
- [6] Litovitz T.A., Davis C.M. Structural and shear relaxation in liquids // Physical acoustics / Ed. W.P. Mason. N.Y.: Academic Press, 1964. V. II A. P. 289–349. DOI: 10.1016/B978-1-4832-2858-7.50013-2
- [7] Dukhin A.S., Goetz P.J. Characterization of liquids, dispersions, emulsions, and porous materials using ultrasound. 3rd ed. Cambridge: Elsevier, 2017. 590 p.
- [8] Malbrunot P., Boyer A., Charles E., Abachi H. // Phys. Rev. A. 1983. V. 27. N 3. P. 1523–1534. DOI: 10.1103/PhysRevA.27.1523
- [9] Jarzynski J. // Proc. Phys. Soc. 1963. V. 81. N 4. P. 745–750. DOI: 10.1088/0370-1328/81/4/317
- [10] Сурнычев В.В., Богданов Д.Л., Беллев В.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 10. С. 51–56.
- [11] Jaeger F., Matar O.K., Müller E.A. // J. Chem. Phys. 2018. V. 148. N 17. P. 174504. DOI: 10.1063/1.5022752