

03

О зависимости коэффициента вязкости наножидкости от размера частиц и температуры

© В.Я. Рудяк, С.В. Димов, В.В. Кузнецов

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: valery.rudyak@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2013 г.

Экспериментально изучена зависимость коэффициента вязкости наножидкостей на основе этиленгликоля с частицами SiO_2 от размера наночастиц и температуры. Эксперименты проводились с наножидкостями со средним размером частиц 18.1, 28.3 и 45.6 nm. Их объемная концентрация изменялась от 0.2 до 8%. Температура жидкости варьировалась в пределах от 20 до 60°C. Показано, что вязкость наножидкости существенно зависит от размера частиц, причем с уменьшением размера частиц вязкость растет. С другой стороны, с ростом температуры вязкость всех исследованных наножидкостей падает.

Исследование свойств переноса наножидкостей мотивировано широким их применением в различных устройствах на основе микро-электромеханических систем (МЭМС). Предполагается, что их также с успехом можно будет использовать в теплообменных устройствах разного типа, системах транспортировки тепловой энергии и т.д. Во всех случаях эффективность использования наножидкости будет существенно зависеть от ее коэффициента вязкости, поскольку последний определяет внешнюю энергию, необходимую для организации течения. Сегодня известно более пятидесяти публикаций, в которых приводятся соответствующие экспериментальные данные (см. обзоры [1,2]). Надежно установлено, что коэффициент вязкости наножидкостей η даже при малых объемных концентрациях частиц ϕ существенно превосходит значение, предсказываемое теорией Эйнштейна [3]: $\eta = \eta_0(1 + 2.5\phi)$ (η_0 — вязкость базовой жидкости). Вместе с тем полученные данные весьма не универсальны и противоречивы. Основные противоречия относятся к зависимости коэффициента вязкости от размера наночастиц.

Большинство авторов до сих пор считают, что, как и в обычных крупнодисперсных жидкостях, такая зависимость отсутствует. Вместе с тем известно примерно десяток экспериментов, где такая зависимость фиксировалась, правда выводы были прямо противоположные. Так, например, в [4] указывается, что вязкость возрастает с ростом размеров наночастиц, а в [5,6] установлено снижение вязкости наножидкостей с ростом размера частиц. На это же указывает и молекулярно-динамическое моделирование [7,8].

Отсутствует и единая точка зрения относительно зависимости коэффициента вязкости наножидкости от температуры, хотя большинство исследователей отмечает снижение вязкости наножидкости с ростом температуры. Здесь ситуация осложняется и тем, что зависимость коэффициента вязкости обычных дисперсных жидкостей от температуры также изучена очень слабо.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению зависимости коэффициента вязкости наножидкостей на основе этиленгликоля с частицами SiO_2 от размера наночастиц и температуры. Эксперименты проводились с наножидкостями со средним размером частиц 18.1, 28.3 и 45.6 nm. Температура жидкости изменялась от 20 до 60°C.

Нанопорошок частиц SiO_2 был получен при испарении исходного кварцевого материала с последующей конденсацией паров вещества в виде твердых наночастиц [9]. Массовая концентрация наночастиц в этиленгликоле варьировалась от 0.5 до 15%, это соответствовало объемной концентрации от 0.2 до 8%. Максимальная исследуемая концентрация суспензии зависела от размера частиц. В процессе приготовления суспензии к измеренной массе этиленгликоля добавлялась необходимая масса нанопорошка и механически размешивалась. Затем емкость с наножидкостью для разрушения конгломератов наночастиц помещалась в ультразвуковой смеситель (частота воздействия составляла около 35 kHz). Обработка в смесителе занимала 15–30 min. Контрольные измерения показали, что наножидкости, полученные при ультразвуковой обработке 15, 30 и больше минут, имели одинаковую вязкость.

Измерение вязкости выполнялось на ротационном вискозиметре. Точность измерений была 1% полной шкалы прибора. Для контрольных измерений использовался также капиллярный вискозиметр ВПЖ 2 с диаметром капилляра 1.31 mm. Чтобы обеспечить измерения при заданной температуре, эксперименты проводились с использованием термостата. Точность фиксации температуры составляла 0.1°C.

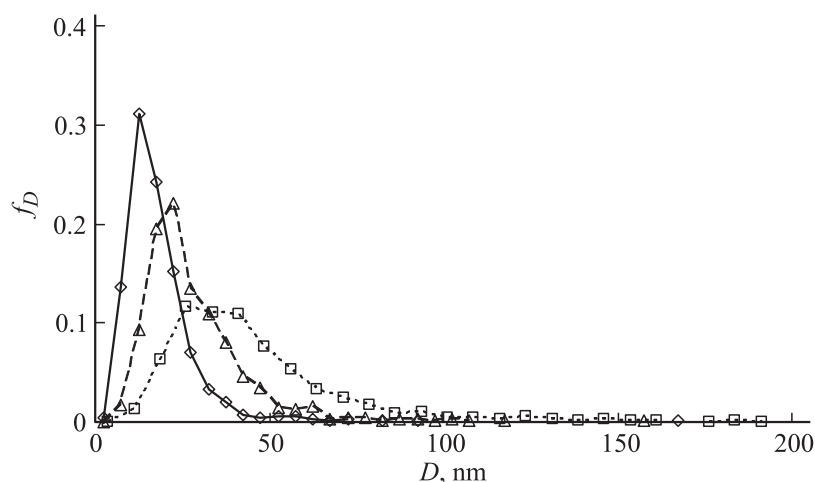


Рис. 1. Дифференциальные распределения наночастиц SiO₂ по размерам.

Были выполнены тестовые измерения коэффициента вязкости чистого этиленгликоля. Полученное значение коэффициента вязкости 17.1 сР при температуре $T = 25^\circ\text{C}$ согласуется с точностью порядка процента с известными экспериментальными данными [10]. Данные, полученные капиллярным и ротационным вискозиметрами, в пределах точности измерений были одинаковы.

Выше уже говорилось, что одной из целей данной работы было определение зависимости коэффициента вязкости данной наножидкости от размеров наночастиц. Это предъявляло повышенные требования к точности определения среднего размера частиц в жидкости и их распределения по размерам. Дифференциальные распределения части по размерам, полученные с помощью обработки ансамбля электронных микрофотографий, представлены на рис. 1. Здесь ромбики соответствуют частицам со средним размером 18.1 nm, треугольники — 28.3 nm, квадратики — 45.6 nm. Во всех случаях данные распределения фактически являются логнормальными.

В эксперименте для наножидкости с частицами заданного размера измерялась зависимость коэффициента вязкости от массовой концентрации c наночастиц. Затем по формуле $\phi = c[c + (1 - c)\rho_p/\rho]^{-1}$

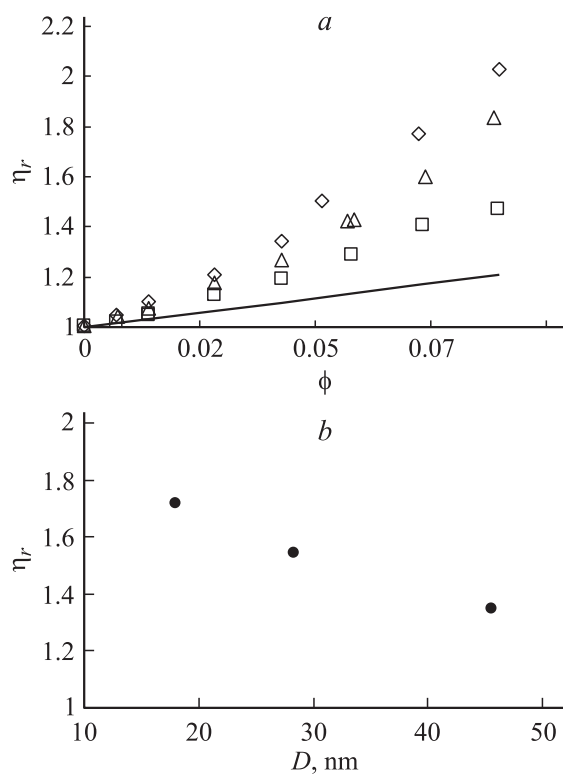


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента вязкости наножидкости этиленгликоль с наночастицами SiO_2 от их объемной концентрации (а) и от размера наночастиц при объемной концентрации 6.75% (b).

определялась их объемная концентрация ϕ , здесь ρ_p — плотность материала частиц, ρ — плотность несущей жидкости. Средняя плотность материала наночастиц равнялась 2.2 g/cm^{-3} . Полученные зависимости относительного коэффициента вязкости $\eta_r = \eta/\eta_0$ от объемной концентрации наночастиц представлены на рис. 2, а. Эти измерения выполнены при температуре 25°C . Здесь снова ромбики соответствуют частицам со средним размером 18.1 nm, треугольники — 28.3 nm, квадратики — 45.6 nm. Линия соответствует значению коэффициента

вязкости, определяемому теорией Эйнштейна: $\eta_r = 1 + 2.5\phi$. С увеличением концентрации частиц коэффициент вязкости существенно увеличивается, при массовой концентрации наночастиц, равной 7%, вязкость наножидкости с наиболее крупными частицами увеличилась на 40%, а с самыми маленькими — почти на 80% по сравнению с вязкостью этиленгликоля.

Коэффициенты вязкости с уменьшением размера наночастиц растут. Типичная зависимость коэффициента вязкости рассматриваемой наножидкости от диаметра частиц представлена на рис. 2, *b*. Эти данные получены для наножидкостей с объемной концентрацией наночастиц 6.75%, температура жидкости составляла 25°C. Зависимость коэффициента вязкости от размера наночастиц неплохо описывается экспоненциальной функцией вида $\exp(-aD/d)$, где D , d — диаметры наночастицы и молекулы несущей жидкости соответственно, a — некоторый коэффициент, который, вообще говоря, зависит от концентрации частиц и температуры.

Зависимость коэффициента вязкости наножидкости от температуры является важнейшей ее теплофизической характеристикой. В жидкостях, в отличие от газов, коэффициент вязкости с ростом температуры уменьшается. Из физических соображений следует ожидать такого же поведения и для наножидкости. Практически во всех известных работах, где такая зависимость определялась, вязкость наножидкости с ростом температуры действительно падает. Исключение составляет статья [11], где получены весьма противоречивые данные. Точность измерения коэффициента вязкости в этих экспериментах, однако, невысока: 3% при 20°C и около 11% при 40°C. Общая библиография статей, где зависимость вязкости наножидкости от температуры изучалась, насчитывает около 40 наименований, часть из которых можно найти в обзорах [1,2]. Получаемые зависимости коэффициента вязкости от температуры во всех работах достаточно типичны. Естественно, коэффициент вязкости будет зависеть от объемного содержания наночастиц. На рис. 3, *a* в качестве примера приведены данные зависимости коэффициента вязкости наножидкости с частицами размером 28.3 nm от температуры.

Для описания зависимости коэффициента вязкости наножидкости от температуры предлагалось довольно много различных корреляций (см. [1,2]), однако все они не универсальны и существенно меняются в зависимости от концентрации наночастиц, их материала и размера, от вязкости базовой жидкости. По этой причине полезно понять

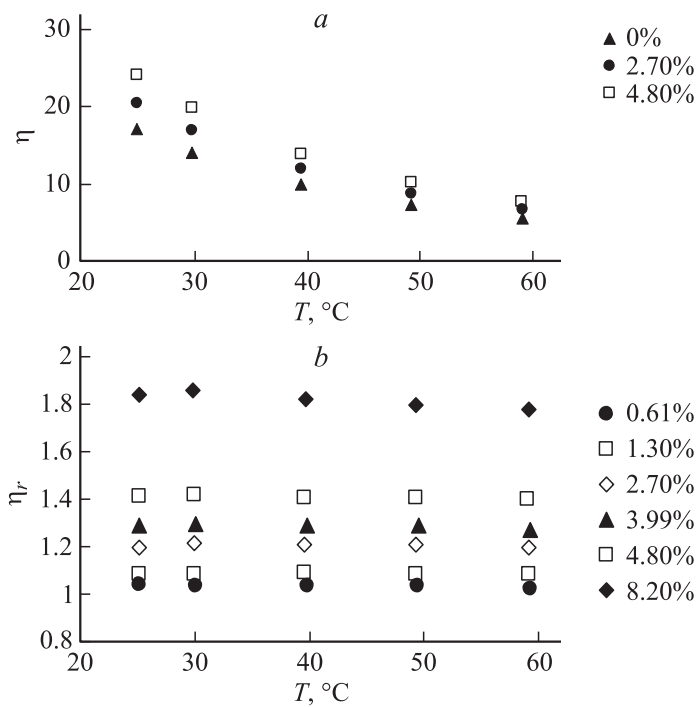


Рис. 3. Зависимость коэффициента вязкости наножидкости от температуры для трех объемных концентраций (а) и относительного коэффициента вязкости наножидкости от температуры для разных объемных концентраций (б).

зависимость от температуры относительного коэффициента вязкости наножидкости η_r . Для наножидкости, представленной на рис. 3, а, зависимость η_r от температуры приведена для разных концентраций наночастиц на рис. 3, б. При низких и умеренных концентрациях наночастиц относительный коэффициент вязкости не меняется с ростом температуры и лишь при концентрации, равной 8.2%, несколько снижается (примерно на 3%). Подобная зависимость наблюдалась и в работах [12–14], где изучались наножидкости на основе этиленгликоля и частиц TiO_2 , раствора этиленгликоля и воды, частиц SiO_2 и воды и частиц Al_2O_3 и CuO соответственно.

В заключение необходимо подчеркнуть три важных обстоятельства. В данной работе показано, что размер наночастиц является важнейшим фактором, определяющим вязкость наножидкости. И ее вязкость при заданной объемной (или) массовой концентрации частиц тем выше, чем меньше размер наночастиц.

С ростом температуры коэффициент вязкости наножидкости снижается. Это снижение для наножидкостей с частицами различного размера, вообще говоря, разное. Однако относительный коэффициент вязкости наножидкости η_r при по крайней мере не слишком высоких концентрациях наночастиц практически не зависит от температуры. Это свидетельствует о том, что зависимость коэффициента вязкости наножидкостей от температуры при рассмотренных концентрациях наночастиц определяется главным образом зависимостью от температуры вязкости базовой жидкости.

Наконец следует отметить, что все феноменологические теории вязкости обычных дисперсных жидкостей не описывают наблюдаемых для наножидкостей экспериментальных данных. Коэффициент вязкости наножидкостей существенно выше, чем это предсказывается этими теориями и известными экспериментальными корреляциями.

Авторы признательны профессору С.П. Бардаханову, предоставившему для экспериментов порошки наночастиц.

Данная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-01-00052).

Список литературы

- [1] *Hosseini S.Sh., Shahrjerdi A., Vazifeshenas Y.* // Australian J. Basic and Applied Sciences. 2011. V. 5 (10). P. 417–435.
- [2] *Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 874–885.
- [3] *Einstein A.* // Annalen der Physik. 1906. V. 19. P. 289–306.
- [4] *Hey Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. N 11–12. P. 2272–2281.
- [5] *Chevalier J., Tillement O., Ayela F.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91(23). P. 233 103.
- [6] *Timofeeva E.V., Smith D.S., Yu W., France D.M., Singh D., Routbo J.L.* // Nanotechnology. 2010. V. 21. N 21. P. 215 703.

- [7] Рудяк В.Я., Белкин А.А., Егоров В.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 8. С. 18–25.
- [8] Rudyak V.Ya., Belkin A.A., Tomilina E.A., Egorov V.V. // Defect and Diffusion Forum. 2008. V. 273–276. P. 566–571.
- [9] Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К. и др. // ДАН. 2006. Т. 409. № 3. С. 320–323.
- [10] Chen H., Ding Yu., Tan C. // New J. Physics. 2007. V. 9. N 367. P. 25–51.
- [11] Prasher P., Song D., Wang J. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 133 108.
- [12] Namburu P.K., Kulkarni D.P., Dandekar A., Das D.K. // Micro Nano Lett. 2007. V. 2. P. 67–71.
- [13] Nguyen C.T. et al. // Int. J. Therm. Sci. 2008. V. 47. P. 103–111.
- [14] Chen H., Ding Y., Tan C. // New J. Physics. 2007. V. 9. P. 367.