

03

## Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия

© В.Я. Рудяк<sup>1</sup>, А.В. Минаков<sup>1,2,¶</sup>, М.И. Пряжников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

¶ E-mail: Aminakov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 27 июня 2016 г.

Проведено экспериментальное исследование зависимости числа Прандтля для наножидкости от концентрации, размера и материала наночастиц. Исследуемые наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды и наночастиц оксидов кремния, алюминия, титана и циркония. Объемная концентрация наночастиц изменялась в диапазоне от 1 до 8%. Диаметр наночастиц варьировался от 10 до 150 nm. Установлено, что с ростом концентрации наночастиц число Прандтля для наножидкостей возрастает. При этом показано, что значение числа Прандтля существенно зависит от размера частиц. С увеличением размера частиц число Прандтля для наножидкостей уменьшается.

Наножидкости, т. е. дисперсные жидкости с наночастицами, активно изучаются уже более двадцати лет. Это связано, во-первых, с многочисленными уже существующими или планируемыми приложениями, а во-вторых, с их нестандартными свойствами. Теплофизические свойства наножидкостей, в частности их вязкость и теплопроводность, не описываются классическими теориями (см., например, [1–3]). И коэффициент вязкости, и коэффициент теплопроводности наножидкостей зависят не только от концентрации частиц, но и от их размера. Сегодня уже ясно, что вязкость наножидкостей существенно превышает вязкость крупнодисперсных жидкостей, а в работах [4,5] методом молекулярной динамики и экспериментально установлено, что она зависит также от материала частиц. Данные измерений коэффициента теплопроводности все еще остаются достаточно противоречивыми. Наряду с констатацией его роста с увеличением размера частиц [1] существуют и прямо противоположные мнения (см., например, [6,7]). Поэтому изучение зависимости коэффициента теплопроводности наножидкости от размера

Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей от объемной концентрации наночастиц

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (150 nm)			TiO <sub>2</sub> (150 nm)			ZrO <sub>2</sub> (44 nm)			ZrO <sub>2</sub> (105 nm)		
$\varphi$	$\lambda$	$\mu$	$\varphi$	$\lambda$	$\mu$	$\varphi$	$\lambda$	$\mu$	$\varphi$	$\lambda$	$\mu$
0.01	1.06	1.06	0.01	1.05	1.09	0.02	1.08	1.17	0.02	1.09	1.14
0.02	1.13	1.13	0.02	1.10	1.18	0.04	1.14	1.32	0.04	1.17	1.24
0.04	1.18	1.38	0.04	1.15	1.57	0.06	1.17	1.59	0.06	1.22	1.52
0.06	1.24	1.60	0.06	1.21	1.91	0.08	1.19	2.16	0.08	1.28	2.11

частиц все еще актуально и является первой задачей данной работы. На практике во всех приложениях наножидкостей и в лабораторных исследованиях имеют место их течения. При описании течений наножидкостей, как и обычных флюидов, используют известные критерии подобия: числа Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта и т.д. Однако сложная зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности от концентрации наночастиц, их размера и материала делает нередко получаемые выводы неадекватными. Одним и тем же значениям тех или иных критериев подобия могут соответствовать просто различные наножидкости. Изучение зависимости указанных критериев подобия от теплофизических характеристик наножидкостей — вторая задача этой заметки.

Коэффициент вязкости наножидкостей измерялся с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV2T с адаптером для малой вязкости ULA(0) (см. также [5]). Погрешность измерения коэффициентов вязкости была не выше 2%. Для измерения коэффициента теплопроводности применялся метод нагреваемой проволоочки, используемая установка и ее тестирование детально описаны в работе [8]. Итоговая относительная погрешность измерения коэффициента теплопроводности составляла около 2%. Анализ погрешности показал, что итоговая относительная погрешность определения числа Прандтля составляет 3%.

Исследовались наножидкости на основе дистиллированной воды и наночастиц. Для их приготовления применялся стандартный двухшаговый процесс. После добавления в воду необходимого количества нанопорошка наножидкость сначала механически перемешивалась, а затем обрабатывалась в ультразвуковой ванне „Сапфир“. Наночастицы были приобретены у компании „Плазмотерм“ (Москва). Изучена вяз-

кость и теплопроводность почти пяти десятков наножидкостей. Во всех случаях частицы имели сферическую (или близкую к ней) форму. Измерение распределения наночастиц по размерам уже непосредственно в жидкости было проведено с помощью прибора CPS Disk Centrifuge DC24000. Объемная концентрация частиц варьировалась от 1 до 8%, а их размеры — от 10 до 150 nm.

Данные измерений, проведенных при температуре 25°C, представлены в таблице и на рис. 1. При рассмотренных концентрациях  $\varphi$  зависимость коэффициента вязкости от нее во всех случаях может быть описана формулой

$$\mu = \mu_0(1 + a_1\varphi + a_2\varphi^2), \quad (1)$$

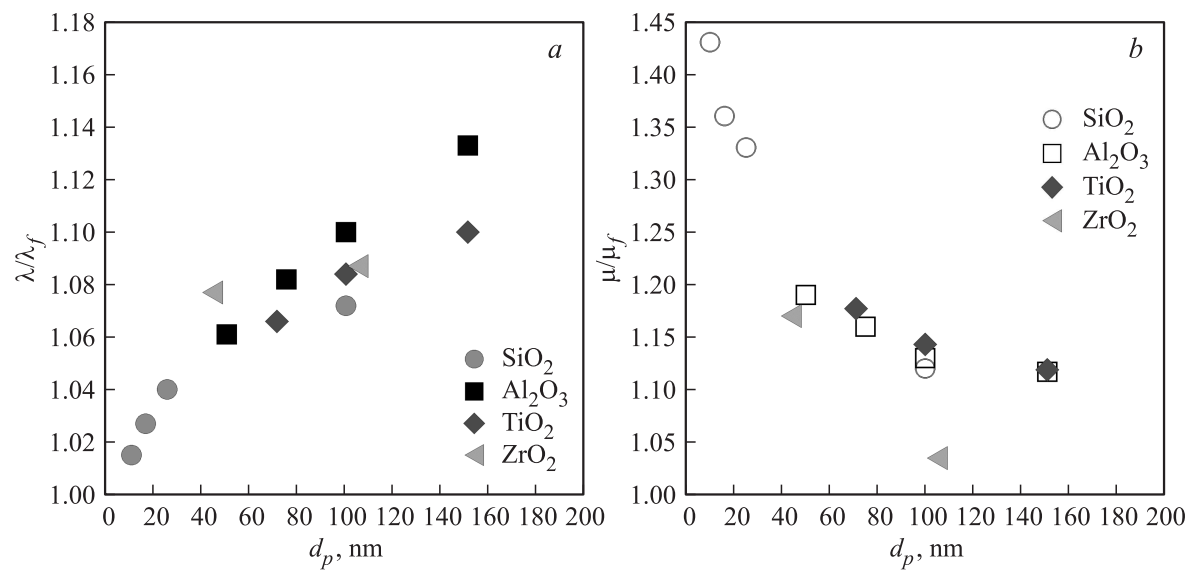
где  $\mu_0$  — коэффициент теплопроводности базовой жидкости (воды), а  $a_i$  — некоторые константы. Полученные данные свидетельствуют о том, что, во-первых, вязкость наножидкости существенно выше вязкости воды и не описывается классическими теориями (Эйнштейна, Бэтчелора и т.п.). Так, например, теория Эйнштейна, применяемая при концентрации 1%, дает во всех случаях одинаковое значение, равное 1.025 (см. таблицу). Во-вторых, коэффициент вязкости наножидкостей действительно зависит от размера и материала частиц, причем он тем больше, чем меньше этот размер. Наконец, коэффициент вязкости у наножидкостей тем больше, чем выше плотность материала входящих в нее частиц.

Коэффициент теплопроводности так же, как и коэффициент вязкости, зависит от размера наночастиц, он растет с увеличением размера частиц. Его зависимость от концентрации частиц снова можно аппроксимировать простой формулой, которая, однако, качественно отличается от (1):

$$\lambda = \lambda_0(1 + b_1\varphi - b_2\varphi^2). \quad (2)$$

Здесь  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности базовой жидкости (воды), а  $b_i$  — некоторые константы. Зависимость (2) показывает, что, начиная с некоторых концентраций частиц, рост коэффициента теплопроводности замедляется, а затем выходит на некоторое предельное значение. Это соответствует и другим известным экспериментальным данным [9,10] и молекулярно-динамическому моделированию [11].

Разберемся теперь с особенностями использования критериев подобия при описании течений наножидкостей. Вначале рассмотрим число Рейнольдса  $Re = (\rho UL)/\mu$  ( $\rho$ ,  $U$  — соответственно плотность и характерная скорость жидкости, а  $L$  — характерный масштаб течения,

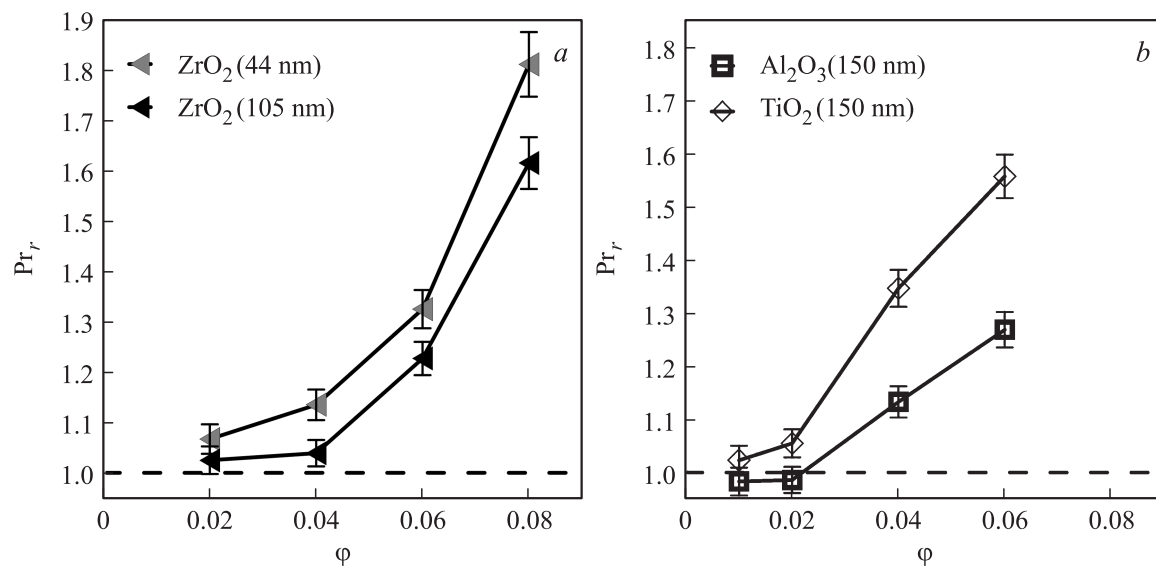


**Рис. 1.** Зависимость относительного коэффициента теплопроводности наножидкостей (a) и относительного коэффициента вязкости наножидкостей (b) от размера частиц,  $\varphi = 2\%$ .

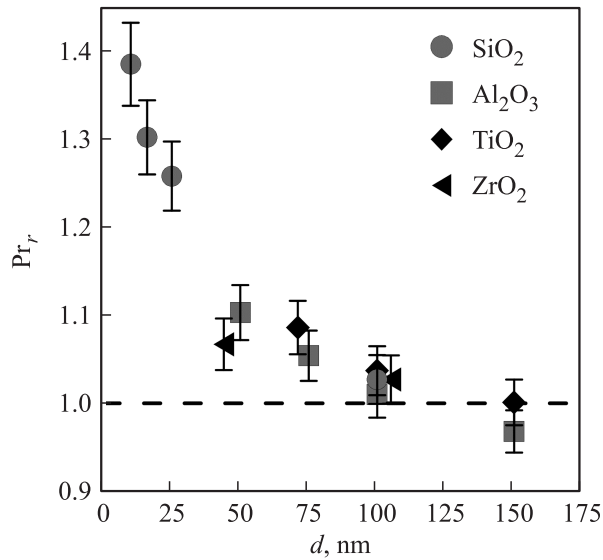
диаметр канала, расстояние между пластинами и т.п.) Плотность является линейной функцией концентрации наночастиц, а коэффициент вязкости — квадратичной (см. (1)). Таким образом, число Рейнольдса также является квадратичной функцией концентрации частиц. Далее, коэффициенты  $a_i$  в формуле (1) являются функциями размера частиц и их материала. Поэтому часто приводящиеся в работах по моделированию течений наножидкостей зависимости тех или иных параметров от числа Рейнольдса без конкретизации характеристик наножидкости просто невозможно физически разумно интерпретировать. Гораздо сложнее обстоит дело с числом Прандтля  $Pr = (C_p \mu) / \lambda$ , где  $C_p$  — теплоемкость жидкости. Экспериментально показано [12], что теплоемкость наножидкости хорошо описывается выражением  $C_p = [(1 - \varphi)\rho_f C_{pf} + \varphi\rho_p C_{pp}] \rho^{-1}$ , где  $\rho_f$  и  $C_{pf}$  — плотность и теплоемкость несущей жидкости,  $\rho_p$  и  $C_{pp}$  — плотность и теплоемкость материала наночастицы,  $\rho$  — плотность наножидкости:  $\rho = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p$ . Сопоставление соотношений (1) и (2) показывает, что при рассматриваемых небольших (примерно до 10%) концентрациях частиц число Прандтля также является квадратичной функцией  $\varphi$  концентрации частиц ( $Pr_w$  — число Прандтля воды)

$$Pr = Pr_w [1 + k_1(d, m)\varphi + k_2(d, m)\varphi^2]. \quad (3)$$

Пример зависимости (3) показан на рис. 2, *a* для наножидкости с частицами  $ZrO_2$ , с ростом концентрации частиц число Прандтля наножидкости значительно возрастает. Однако коэффициенты  $k_i$  в (3) не универсальны, они зависят от размера частиц  $d$  и их материала  $m$ . Первая зависимость иллюстрируется рис. 2, *a*, вторая — рис. 2, *b*, где приведены данные наножидкости на основе воды с частицами  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  в зависимости от их концентрации (см. таблицу), причем размеры частиц в обоих случаях были одинаковы. Стоит отметить, что коэффициенты  $k_i$  в (3) в общем случае могут быть знакопеременными. Поэтому при некоторых значениях параметров наножидкости число Прандтля наножидкости может оказаться ниже числа Прандтля базовой жидкости. На рис. 2, *b* это наблюдается в наножидкости при малых концентрациях оксида алюминия. Наблюдаемое повышение числа Прандтля с ростом концентрации частиц связано с тем, что с ее увеличением коэффициент вязкости наножидкости возрастает значительно быстрее, чем коэффициент теплопроводности. Действительно, в приведенных данных измерений максимальное превышение коэффициента теплопроводности фиксируется у наножидкости с частицами  $ZrO_2$  (выше 28%), в то



**Рис. 2.** Зависимость относительного числа Прандтля  $Pr_r = Pr/Pr_w$  наножидкости на основе воды от концентрации частиц  $ZrO_2$  (a) и от концентрации частиц  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  (b).



**Рис. 3.** Зависимость относительного числа Прандтля наножидкости  $Pr_r$  от размера наночастиц,  $\varphi = 2\%$ .

же время коэффициент вязкости с увеличением концентрации частиц возрастает более чем вдвое. Тем не менее возможно и обратное. Особенно значительный рост коэффициента теплопроводности наножидкостей наблюдается при использовании металлических частиц (даже при очень низких их концентрациях, см., например, обзор [13]). Коэффициент вязкости и теплоемкость такой наножидкости меняются очень слабо и будет наблюдаться снижение числа Прандтля по сравнению с соответствующим значением для базовой жидкости.

Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей от размера наночастиц противоположная: вязкость с уменьшением размера частиц растет, а теплопроводность падает. Поэтому максимальные значения числа Прандтля должны наблюдаться у наножидкостей с малыми частицами. По мере их роста число Прандтля будет снижаться. Это подтверждает рис. 3, построенный по данным рис. 1. Как видно, при концентрации частиц 2% зависимость числа Прандтля наножидкостей от индивидуальных свойств материалов частиц —

порядка погрешности измерений. Зависимость от материала становится заметной только при более высоких концентрациях (рис. 2, b).

В заключение отметим, что еще более сложная ситуация реализуется при использовании числа Нуссельта  $Nu = \alpha L/\lambda$ , где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи. При небольших концентрациях наночастиц коэффициент теплоотдачи растет пропорционально концентрации частиц, но одновременно он в общем случае зависит от их размера, а также вязкости наножидкости [14,15].

Таким образом, в данной работе впервые было показано, что с ростом концентрации наночастиц число Прандтля для наножидкостей возрастает. При этом установлено, что значение числа Прандтля для наножидкостей уменьшается с увеличением размера частиц.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-00312).

## Список литературы

- [1] *Timofeeva E.V. et al. // Nanotechnology. 2010. V. 21. N 21. P. 215703.*
- [2] *Рудяк В.Я. // Вестник НГУ. Физика. 2015. Т. 10. № 1. С. 5–22.*
- [3] *Kumar P.M. et al. // Engineering J. 2015. V. 19. Iss. 1. P. 67–83.*
- [4] *Rudyak V.Yz., Krasnolutskiy S.L. // Phys. Lett. A. 2014. V. 378. P. 1845–1849.*
- [5] *Рудяк В.Я., Минаков А.В., Сметанина М.С., Пряжников М.И. // Доклады Академии наук. 2016. Т. 467. № 3. С. 289–292.*
- [6] *Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 153107.*
- [7] *Minisa H.A., Roy G., Nguyen C.T., Doucet D. // Int. J. Thermal Sci. 2009. V. 48. P. 363–371.*
- [8] *Минаков А.В. и др. // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 1. С. 148–160.*
- [9] *Zhu H.T., Zhang C.Y., Tang Y.M., Wang J.X. // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 1646–1650.*
- [10] *Kebllinski P., Prasher R., Eapen J. // J. Nanopartarticles Res. 2008. V. 10. P. 1089–1097.*
- [11] *Рудяк В.Я., Белкин А.А. // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. 2010. Т. 1. № 1. С. 156–177.*
- [12] *Zhou S.Q., Ni R. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 93–123.*
- [13] *Wang X.-Q., Mujumdar A.S. // Int. J. Thermal Sci. 2007. V. 46. P. 1–19.*
- [14] *Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я., Дектерев А.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 5. С. 34–42.*
- [15] *Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я. // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 2. С. 65–75.*