

Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия

В.Я. Рудяк¹, А.В. Минаков^{1,2}, М.И. Пряжников^{1,2}

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет; Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Aminakov@sfu-kras.ru

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 нм. 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, то есть 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 также 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 об измерении 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 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 не адекватными. 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 коэффициента вязкости была не выше 2 %. Для измерения коэффициента теплопроводности применялся метод нагреваемой проволочки, используемая установка и ее тестирование детально описана 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 двух шаговый 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 вязкость и теплопроводность почти пяти десятков наножидкостей. Во всех случаях частицы имели сферическую (или близкую к ней) форму. Измерение распределения наночастиц по размерам уже непосред-

ственно в жидкости было проведено с помощью прибора CPS Disk Centrifuge DC24000. Концентрации частиц варьировались от 0.25 до 8%, а их размеры – от 10 до 150 nm.

Данные проведенных измерений представлены в таблице 1 и на рисунке 1 и получены при температуре 25 °С. При рассмотренных концентрациях φ 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 μ_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, применимая при концентрации 1% дает во всех случаях одинаковое значение равное 1.025(см. таблицу 1). Второе. 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 λ_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. В начале рассмотрим число Рейнольдса $Re = (\rho UL) / \mu$ (ρ, U – соответственно плотность и характерная скорость жидкости, а L – характерный масштаб течения, 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 φ – объёмная концентрация частиц, ρ_f , и C_{pf} – плотность и теплоемкость несущей жидкости, ρ_p и C_{pp} – плотность и теплоемкость материала наночастицы, ρ – 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 φ 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. 2а 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. 2а. Вторая зависимость иллюстрируется рис. 2б, где приведены данные наножидкости на основе воды с частицами Al_2O_3 и TiO_2 от их концентрации (см. таблицу 1), причем размеры частиц в обоих случаях были одинаковы. Сто-

ит 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. 2b 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 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 меняется 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 относительные 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 (см. рис. 2б).

В заключение отметим, что еще более сложная ситуация реализуется при использовании числа Нуссельта $Nu = \alpha L / \lambda$, где α – коэффициент теплоотдачи. При небольших концентрациях наночастиц коэффициент теплоотдачи растет пропорционально концен-

трации 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, No. 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. Issue 1. P. 67–83.
4. Rudyak V.Ya., Krasnolutskii 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. Mintsu 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. 1646–1650.
10. Koblinski 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 Sciences*. 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. Вып. 5. С. 34–42.
15. Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я. // *Изв. РАН. МЖГ*. 2016. № 2. С. 65–75.

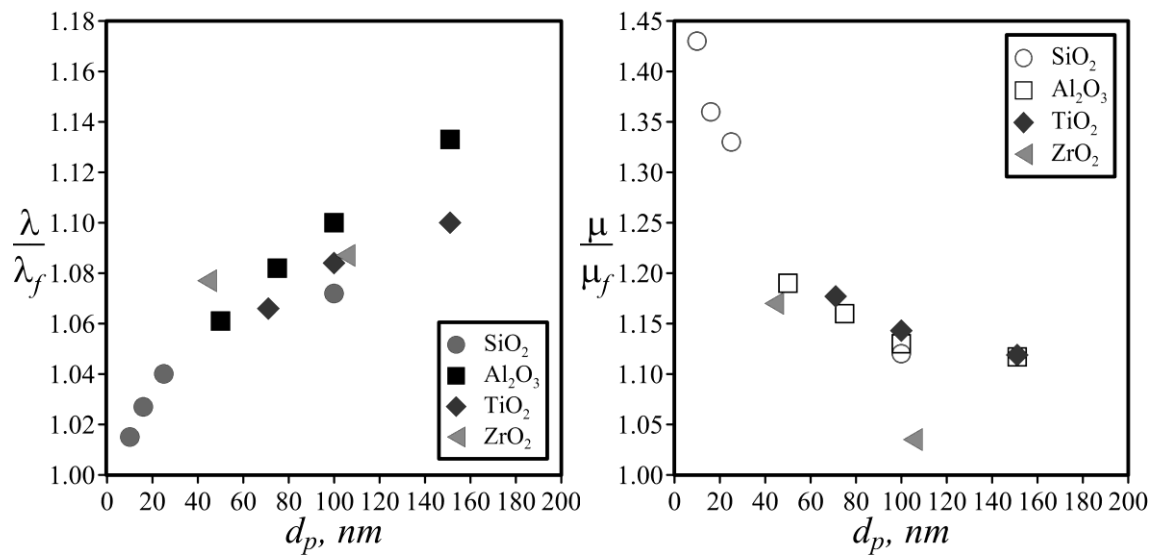


Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента теплопроводности наножидкостей (а) и относительного коэффициента вязкости наножидкостей (б) от размера частиц, $\varphi = 2\%$

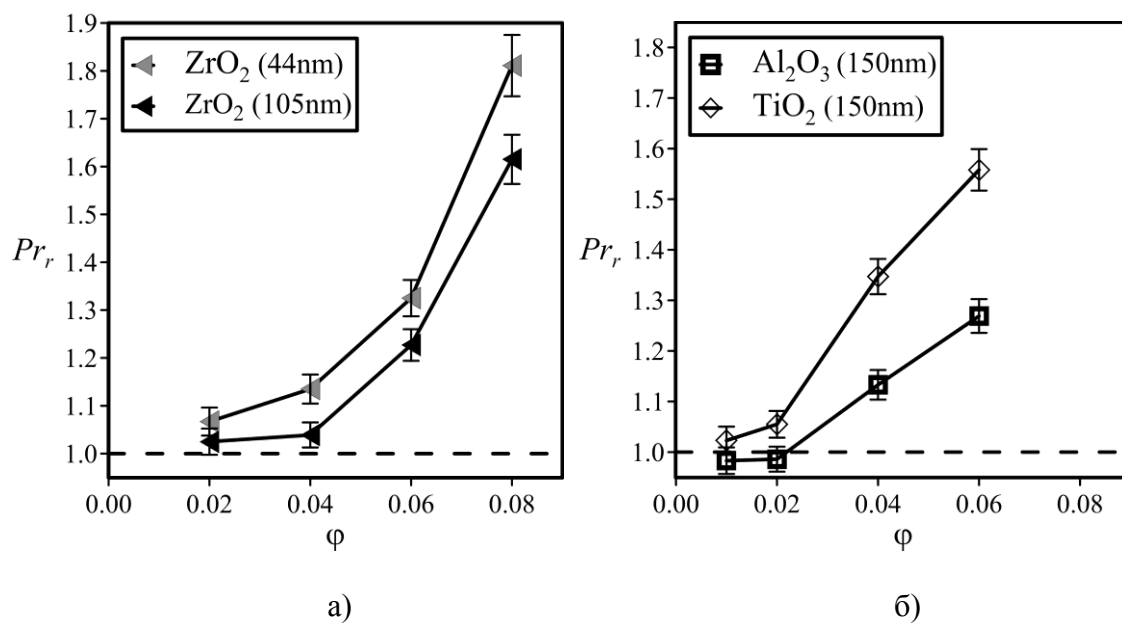


Рис. 2. Зависимость относительного числа Прандтля $Pr_r = Pr/Pr_w$ наножидкости на основе воды от концентрации частиц ZrO_2 (a) и от концентрации частиц Al_2O_3 и TiO_2 (b).

Здесь Pr_w – число Прандтля воды.

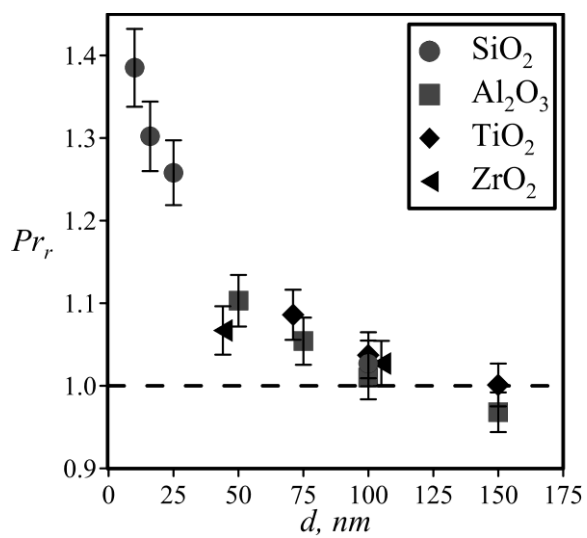


Рис.3. Зависимость относительного числа Прандтля наножидкости Pr_r от размера наночастиц, $\varphi = 2\%$

Таблица.1. Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей от
 объемной концентрации наночастиц

Al ₂ O ₃ (150 nm)			TiO ₂ (150 nm)			ZrO ₂ (44 nm)			ZrO ₂ (105 nm)		
φ	λ	μ	φ	λ	μ	φ	λ	μ	φ	λ	μ
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