

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Сметанина М. С., Лобасов А. С.,  
научный руководитель канд. физ.-мат. наук Минаков А. В.  
*Сибирский федеральный университет*

На сегодняшний день все большую популярность набирают исследования в области различных наноструктур, в частности наножидкостей. Наножидкости характеризуются особыми свойствами переноса - в отличие от крупных дисперсных частиц наночастицы практически не седиментируют, они не подвергают эрозии каналы, по которым движутся. Уникальные свойства наножидкостей резко расширяют границу их применимости. Вместе с тем, систематическое использование наножидкостей станет возможным лишь в том случае, если можно будет заранее предсказывать их свойства. Поэтому изучение свойств наножидкостей — актуальная и важная задача.

Наножидкости представляют собой двухфазную систему, состоящую из несущей среды (жидкости или газа) и наночастиц. Наночастицы — это частицы с характерными размерами от 1 до 100 нм. Типичными несущими жидкостями является вода, органические жидкости (этиленгликоль, масло, биологические жидкости), полимерные растворы. В качестве твердых наночастиц обычно выступают частицы химически устойчивых металлов и их оксидов.

Изучение процессов переноса в наножидкостях имеет и важную фундаментальную составляющую, поскольку, до сих пор, часто отсутствует даже качественное их понимание, не говоря уже о построении последовательной физической теории. Несмотря на немалый накопленный фактический материал, как экспериментальный, так и теоретический, здесь все ещё отсутствуют систематические данные, а результаты экспериментов часто противоречивы. Связано это, в том числе, и с объективными причинами, осложняющими проведение соответствующих экспериментов. В частности, пока не удастся точно контролировать размеры и однородность распределения наночастиц, создавать монодисперсные наножидкости, добавление наночастиц может приводить к изменению реологии жидкости. Становится невозможным определить, как будут меняться свойства переноса наножидкостей при варьировании того или иного параметра системы: материала наночастиц, их формы, размеров, объемной концентрации и т.п.

Вязкость наножидкостей является важным параметром при течении жидкости. Тем не менее, собранные данные показали, что до сих пор нет теоретических моделей (Einstein [1]; Brinkman [2]; Batchelor [3]; Frankel & Acrivos [4]; Graham [5]; Lundgren [6]) успешно и точно предсказывающих вязкость наножидкости. Почти все формулы были получены из новаторской работы Эйнштейна [1], которая основана на предположении о линейной вязкости жидкости, содержащей разбавленные, растворённые и сферические частицы. Формула Эйнштейна оказывается действительной для относительно низкой объемной концентрации частиц менее 0,01. Помимо этого значения, она «недооценивает» эффективную вязкость смеси. Позже, многие работы были посвящены «исправлению» его формулы. Brinkman [2] распространил формулу Эйнштейна для её использования при умеренной концентрации частиц. Lundgren [6] предложил уравнение в виде ряда Тейлора. Batchelor [3] рассмотрел влияние Броуновского движения частиц на объёмное напряжение приблизительно изотропных взвесей из жестких и сферических частиц. Graham [5] обобщил работу Frankel & Acrivos [4], но корреляция была представлена для низких концентраций.

Masuda et al. [7] были первыми, кто провёл измерения вязкости нескольких наножидкостей на водной основе для диапазона температур от комнатной до 67 °С. Wang et al. [8] получили, используя три различных метода подготовки, некоторые данные для динамической вязкости  $Al_2O_3$ -вода и  $Al_2O_3$ -этиленгликоль при различных температурах.

Поскольку формулы, такие как, например, предложенная А. Эйнштейном [1], а затем улучшенная Brinkman [2] и Batchelor [3] недооценивают вязкость наножидкости по сравнению с данными измерений, Maiga et al. [9,10], выполнили методом наименьших квадратов построение кривых по некоторым экспериментальным данным Wang et al. [8], в том числе  $Al_2O_3$ -вода и  $Al_2O_3$ -этиленгликоль. Модель Brinkman [2], полученная для двухфазной смеси, в некоторой степени является достаточной для оценки вязкости при относительно низкой объемной доле частиц (т. е.  $\varphi \leq 0,1\%$ ). Тем не менее, она значительно недооценивает вязкость наножидкости по сравнению с экспериментальными данными при высокой концентрации частиц. Различия в относительной вязкости среди экспериментальных данных могут быть из-за разницы в размерах кластеров частиц, дисперсионных методов и методов измерений.

Стоит отметить, что вообще эффективная вязкость есть функция трёх параметров  $\mu_{эфф}(\varphi, T, d)$ : объемная концентрация частиц  $\varphi$ , температура  $T$  и диаметр частиц  $d$ . Однако в данной работе рассматривается зависимость вязкости наножидкости только от объемной концентрации частиц, т.к. на сегодняшний день не существует корреляции эффективной вязкости наножидкости зависящей от всех трех параметров, способной охватить все экспериментальные данные.

Для оценки вязкости суспензии частиц использованы несколько теоретических моделей эффективной вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$ , полученные различными авторами:

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5\varphi) \quad (1)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{1}{(1 - \varphi)^{2,5}} = \mu_0(1 + 2,5\varphi + 4,375\varphi^2 + \dots) \quad (2)$$

$$\mu = \mu_0(1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_0 \frac{1}{1 - 2,5\varphi} = \mu_0(1 + 2,5\varphi + 6,25\varphi^2 + \dots) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5\varphi}{1 - k\varphi}\right) = [1 + 2,5\varphi + (3,125 + 2,5k)\varphi^2] \quad (5)$$

$$1,35 < k < 1,91$$

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{1,25\varphi}{1 - \varphi/0,78}\right] = \mu_0(1 + 2,5\varphi + 4,75\varphi^2 + \dots) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{2,5\varphi}{1 - \varphi}\right] = \mu_0(1 + 2,5\varphi + 2,5\varphi^2 + \dots) \quad (7)$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость транспортной жидкости,  $\varphi$  - объёмная концентрация наночастиц. Формула (1) взята из работы [1], формула (2) - из работы [2], формула (3) - из работы [3], формула (4) - из работы [6], формула (5) - из [11], формула (6) - из [12], формула (7) - из работы [13].

Тем не менее, собранные данные показали, что данные теоретические модели весьма плохо и неточно предсказывают вязкость наножидкости (см. рис. 1). Поэтому, проведя дополнительный всесторонний анализ литературы, для определения динамической вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$  было решено остановиться на следующей корреляции [14]:

$$\mu = \mu_0 (1 + 7,2\phi + 123\phi^2) \quad (8)$$

Для доказательства применимости данной корреляции (см. рис. 1), проведено её сравнение с рассмотренными выше экспериментальными значениями вязкости наножидкостей на основе частиц  $Al_2O_3$  (1)-(7). Как видно из графика, корреляция (8) удовлетворительно описывает поведение вязкости в широком диапазоне концентраций частиц, в отличие от остальных рассмотренных корреляций, которые в той или иной степени занижают истинное значение эффективной вязкости.

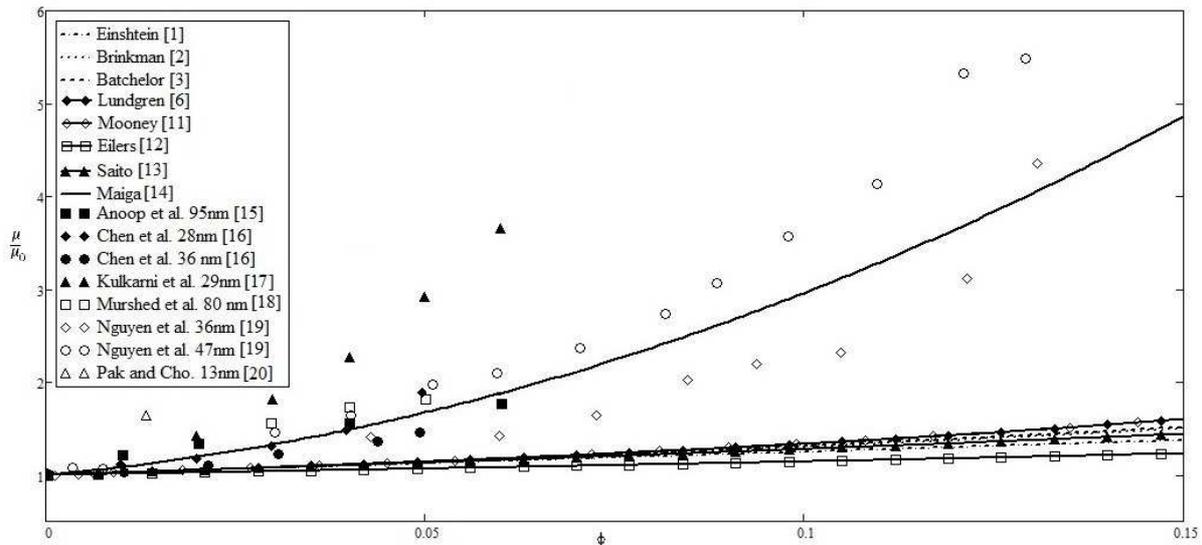


рис.1. Экспериментальные данные и теоретические зависимости относительной вязкости наножидкости на основе  $Al_2O_3$ -вода от объемной концентрации частиц

Как бы то ни было, до сих пор почти ни одна из упоминаемых моделей не может предсказать вязкость наножидкости в широком диапазоне объемной концентрации наночастиц. В соответствии с найденными корреляциями эффективная вязкость зависит только от вязкости базовой жидкости и концентрации частиц, в то время как экспериментальные исследования показывают, что температура, диаметр частиц, и вид наночастиц также могут повлиять на эффективную вязкость наножидкости.

Таким образом, можно констатировать, что на сегодняшний день не существуют универсальных эмпирических корреляций и теоретических моделей с приемлемой точностью описывающих поведения вязкости наножидкости в широком диапазоне параметров. Поэтому необходимо хорошее понимание реологических свойств и режима течения наножидкости перед тем, как наножидкости могут внедряться на рынке в приложениях передачи тепла.

Список публикаций:

- [1] Einstein A. A new determination of the molecular dimensions // Ann. Phys., Vol. 19, Pp. 289-306, 1906.
- [2] Brinkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solution // J. Chem. Phys., Vol. 20, P. 571, 1952.
- [3] Batchelor G.K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in the suspension of spherical particles // J. Fluid Mech., Vol. 83, Pp. 97-117, 1977.
- [4] Frankel N.A. & Acrivos A. On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres // Chem. Eng. Sci., Vol. 22, Pp. 847-853, 1967.

- [5] Graham A.L. On the viscosity of suspension of solid spheres // *Appl. Sci. Res.*, Vol. 37, Pp. 275-286, 1981.
- [6] Lundgren T.S. Slow flow through stationary randombeds and suspensions of spheres // *J. Fluid Mech.*, Vol. 51, Pp. 273-299, 1972.
- [7] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  ultra-fine particles) // *Netsu Bussei* 4, Pp. 227–233, 1993.
- [8] Wang, X.; Xu, X. & Choi, S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture // *J. Thermophys. Heat Tr.*, Vol. 13, Pp. 474-480, 1999.
- [9] Maiga S., Palm S.J., Nguyen C.T., Roy G., Galanis N. Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows // *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 26, Pp. 530–546, 2006.
- [10] Maiga S., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G., Mar'e T., Coqueux M. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticle suspension // *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 16, Pp. 275–292, 2006.
- [11] M. Mooney, The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles // *J. Colloid Sci.*, Vol. 6, Pp. 162–170, 1951.
- [12] V.H. Eilers, Die viskositat von emulsionen hochviskoser stoffe als funktion derkonzentration // *Kolloid-Zeitschrift*, Vol. 97, Pp. 313–321, 1941.
- [13] N. Saito, Concentration dependence of the viscosity of high polymer solutions // *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 5, Pp. 4–8, 1950.
- [14] Maiga S.E.B., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube // *Superlattices Microstruct.*, Vol. 35, Pp. 543-557, 2004.
- [15] Anoop K.B., Kabelac S., Sundararajan T., Das S.K. Rheological and flow characteristics of nanofluids: influence of electroviscous effects and particle agglomeration // *J. Appl. Phys.*, Vol. 106, 2009.
- [16] Chen H., Ding Y., He Y., Tan Ch. Rheological behavior of ethylene glycol based titania nanofluids // *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 444, Pp. 333-337, 2007.
- [17] Kulkarni D.P., Das D.K., Chukwa G. Temperature dependent rheological of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid) // *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 6, Pp.1150–1154, 2006.
- [18] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C. Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (Nanofluids) // *IEEE Emerging Technologies-Nanoelectronic Conference*, 2006.
- [19] Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Marre T., Boucher S., Mintsa H.A. Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids–hysteresis phenomenon // *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, Pp. 1492-1506, 2007.
- [20] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // *Exp. Heat Transfer*, Vol. 11, Pp. 151–170, 1999.